

Proyecto Fin de Carrera  
Ingeniería Industrial

# **Análisis comparativo de los sistemas de producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables.**

Autor: Alejandra Rivero Rodríguez

Tutor: Manuel Felipe Rosa Iglesias

**Departamento de Ingeniería Energética  
Grupo de Termotecnia  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla**

Sevilla, Enero de 2016





Proyecto Fin de Carrera

Ingeniería Industrial

# **Análisis comparativo de los sistemas de producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables.**

Autor:

Alejandra Rivero Rodríguez

Tutor:

Manuel Felipe Rosa Iglesias

Departamento de Ingeniería Energética – Grupo de Termotecnia

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, Enero de 2016



Proyecto Fin de Carrera: ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE  
HIDRÓGENO A PARTIR DE FUENTES RENOVABLES.

Autor: Alejandra Rivero Rodríguez  
Tutor: Manuel Felipe Rosa Iglesias

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal



*A mi familia,  
a mis amigos.*





## Tabla de contenido

<b>0. Índice de figuras.....</b>	<b>3</b>
<b>1.Introducción.....</b>	<b>5</b>
1.1. Evolución sociocultural y consumo de energía.....	5
1.2. Energías alternativas. ....	7
1.3. El hidrógeno como solución universal.....	9
1.4. Objetivo del proyecto. ....	10
<b>2. El hidrógeno.....</b>	<b>11</b>
2.1. Retorno al pasado en busca de energía. ....	11
2.2. El hidrógeno, la fuente de energía alternativa del siglo XXI. ....	11
2.3. Propiedades del hidrógeno.....	12
2.4. Aplicaciones del hidrógeno.....	15
2.4.1. Usos convencionales del hidrógeno. ....	15
2.4.1.1. Hidrógeno en la industria química.....	15
2.4.1.2. Hidrógeno en la industria metalúrgica.....	16
2.4.1.3. Otros usos.....	17
2.4.2. Usos energéticos del hidrógeno. ....	18
2.4.2.1. El hidrógeno como combustible. ....	18
2.4.2.2. El hidrógeno como vector energético. ....	19
2.4.2.3. El hidrógeno como portador de energía. ....	20
2.4.2.4. El hidrógeno y las pilas de combustible. ....	21
<b>3. Producción de hidrógeno.....</b>	<b>22</b>
3.1. Cifras sobre producción de hidrógeno. ....	22
3.2. Sistemas de producción.....	23
3.2.1. Obtención a partir de combustibles fósiles.....	24
3.2.1.1. Reformado mediante vapor. ....	25
3.2.1.2. Gasificación del carbón. ....	27
3.2.1.3. Procesos de oxidación parcial de hidrocarburos. ....	28
3.2.2. Obtención a partir de agua. ....	29
3.2.2.1. Procesos electroquímicos-Electrólisis. ....	30

## ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE FUENTES RENOVABLES.

3.2.2.2.	Procesos termoquímicos. ....	41
3.2.2.3.	Procesos fotoquímicos. ....	47
3.2.3.	Obtención a partir de biomasa. ....	50
3.2.3.1.	Gasificación de la biomasa. ....	51
3.2.3.2.	Pirólisis de la biomasa. ....	51
3.2.3.3.	Oxidación parcial de la biomasa con agua en estado supercrítico. ....	52
3.2.3.4.	Fermentación.....	52
3.3.	Esquema resumen de procesos de producción de hidrógeno.....	54
<b>4.</b>	<b>Comparativa de impacto ambiental.....</b>	<b>57</b>
<b>5.</b>	<b>Comparativa en términos del coste social del carbono.....</b>	<b>61</b>
<b>6.</b>	<b>Comparación financiera.....</b>	<b>63</b>
<b>7.</b>	<b>Conclusión.....</b>	<b>67</b>
	<b>Bibliografía.....</b>	<b>72</b>

## 0. Índice de figuras.

---

<i>Figura 1: Evolución del consumo energético en el mundo y dependencia energética hacia los combustibles fósiles en el consumo de energía primaria. [IPCC, 2007] .....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2: Demanda real de energía eléctrica en España. [Red Eléctrica española, 2015] .....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 3: Tabla de propiedades y características del hidrógeno. [www.elementos.org] .....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 4: Ciclo energético del hidrógeno. [Centro Nacional del Hidrógeno, CNH] .....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 5: Consumo mundial de energía primaria por fuentes. [3] .....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 6: Consumo de hidrógeno, distribución según el tipo de aplicación. [3] .....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 7: Suministro y demanda de hidrógeno. [Comisión Europea, 2003] .....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 8: Proceso empleado para la obtención de hidrógeno a partir de combustibles fósiles. [15] .....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 9: Esquema del proceso de reformado mediante vapor. [15] .....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 10: Métodos de producción de hidrógeno solar. [19] .....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 11: Esquema de placa fotovoltaica para producción de hidrógeno. [18] .....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 12: Proceso electroquímico de obtención de hidrógeno a partir de energía solar. [SchatzEnergy Research Center, 2000] .....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 13: Esquema de un sistema integrado eólica-hidrógeno. ....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 14: Demanda de energía para la electrólisis del agua y del vapor. [22] .....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 15: Esquema del proceso de electrólisis a alta temperatura. [19] .....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 16: Reacciones del ciclo termoquímico Azufre-Yodo. [9] .....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 17: Ciclo termoquímico Azufre-Yodo. [9] .....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 18: Reacciones del ciclo termoquímico UT-3. [9] .....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 19: Esquema del ciclo termoquímico UT-3. [17] .....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 20: Sistema fotoelectroquímico. [24] .....</i>	<i>49</i>

<i>Figura 21: Esquema-resumen de procesos de producción de hidrógeno. [Centro Nacional del Hidrógeno CNH, 2014] .....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 22: Eficiencia y madurez de distintas tecnologías para la producción de hidrógeno. [10] .....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 23: Efectos contaminantes de distintas tecnologías de producción de hidrógeno. [7] ....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 24: Coste social del carbón de distintos métodos de producción de hidrógeno (por kg de hidrógeno). [1] .....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 25: Coste medio de producción de algunos métodos de producción de hidrógeno (por kg de hidrógeno). [1] .....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 26: Coste capital de la producción de hidrógeno. [25] .....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 27: Relación entre la capacidad de producción y el coste capital de determinados métodos de producción de hidrógeno. [25] .....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 28: Comparación global de diversos métodos de producción de hidrógeno. [1] .....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 29: Comparación global normalizada de los métodos de obtención de hidrógeno a partir de electrólisis del agua. [1] .....</i>	<i>69</i>

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1. Evolución sociocultural y consumo de energía.

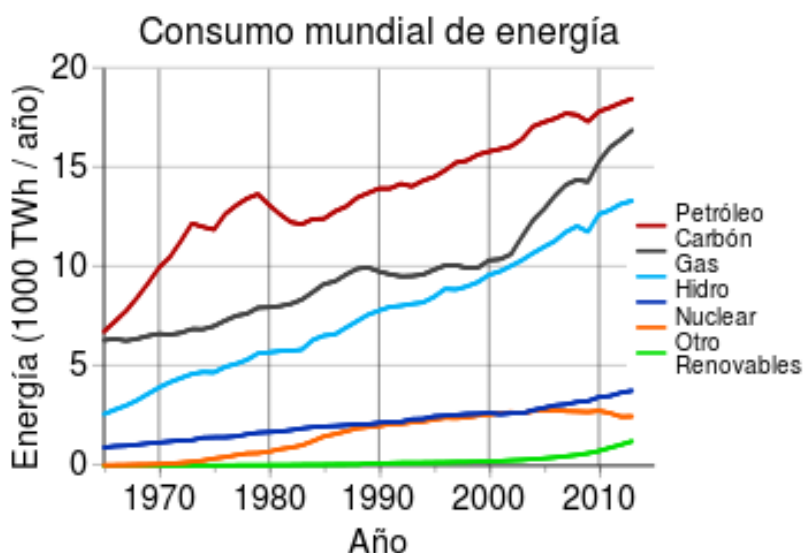
Los suministros adecuados de energía son esenciales para que las naciones del mundo mantengan su expansión industrial y económica. Las economías de los países en desarrollo, con su desarrollo industrial y el aumento en los estándares de vida, están consumiendo electricidad a una tasa que aumenta rápidamente. En indonesia, por ejemplo, la generación de energía se ha duplicado cada 5 años en los últimos 25 años y se espera que siga creciendo como mínimo a este ritmo.

La historia muestra claramente cómo el desarrollo económico de las últimas décadas, y particularmente en los últimos años, ha ido acompañado de un crecimiento de la demanda energética en sus diferentes formas. Actualmente la demanda mundial de energía está incrementándose a una tasa promedio del 2%, se anticipa que este incremento ha de continuar y, por tanto, el consumo de energía será el doble de 1995 a 2030 y el triple en 2050. Cobran fuerza, en este escenario, fuentes energéticas tales como la biomasa (12%) y la energía nuclear (20%). La participación del carbón se proyecta cercana al 40% para el año 2100, momento en el cual el petróleo prácticamente habrá desaparecido como fuente energética.

Sin embargo, la situación energética actual se fundamenta en un modelo energético insostenible, ya que gran parte de la energía consumida proviene de fuentes no renovables, básicamente combustibles fósiles como el carbón, el gas o el petróleo, además de la energía nuclear. Si añadimos que cada año aumenta la población mundial y con ello el consumo energético, esto provoca que estas fuentes energéticas se agoten más rápidamente y que en un futuro no lejano no se pueda abastecer de energía suficiente a toda la población para mantener el nivel de vida de los países desarrollados y los países emergentes.

A pesar del optimismo del consumo actual y de la tranquilidad de los expertos por el continuo descubrimiento de nuevos yacimientos, es evidente, que el petróleo y el gas natural podrían llegar a desaparecer antes de mediados de este siglo si no se introduce

una nueva cultura de consumo. Si observamos cómo ha sido la evolución de este consumo desde la década de los 60 y la dependencia energética hacia los combustibles fósiles en el consumo de energía primaria, podemos concluir que el abastecimiento de energía primaria podría sufrir una crisis importante si no se produce un cambio drástico en este primer cuarto de siglo.



*Figura 1: Evolución del consumo energético en el mundo y dependencia energética hacia los combustibles fósiles en el consumo de energía primaria. [IPCC, 2007]*

Además existe otro gran problema, los gases contaminantes que generan los combustibles fósiles al quemarse. Estos gases son perjudiciales para la salud, ya que son los causantes de numerosas enfermedades pulmonares. También provoca varios efectos negativos para el planeta, como son el efecto invernadero, el calentamiento global, el oscurecimiento global, la lluvia ácida, etc., perjudiciales para la vida y el medio ambiente.

Una de las soluciones a estos problemas pasa por utilizar un modelo energético sostenible, utilizando fuentes renovables de energía como la energía eólica, solar, mareomotriz, o el hidrógeno como combustible. Estas fuentes energéticas son inagotables y limpias, ya que no producen ningún tipo de contaminante ni residuo durante la generación de energía.

Muchos países ya han empezado a apostar por las energías alternativas y se están haciendo investigaciones sobre estas energías, pero todavía se sigue dependiendo de los combustibles fósiles y de la energía nuclear.

Cuando hablamos del consumo de energía pensamos en la energía eléctrica, ya que es la principal energía que consumimos en el día a día, pero no podemos olvidarnos de los vehículos, por ejemplo. Estos también son principales consumidores de energía. En este caso el consumo es de petróleo refinado, ya sea diesel-oil o gasolina en vehículos terrestres, diesel-oil o fuel-oil en barcos o queroseno en las aeronaves. Si tenemos en cuenta todos los vehículos existentes en el mundo, podemos deducir que el consumo de petróleo no es poco. Y como hemos comentado antes. La combustión del petróleo lleva asociado el hecho de que las reservas del mismo son finitas y la contaminación ambiental que provoca.

Así que, llegar a un modelo energético sostenible no sólo pasa por generar energía eléctrica con fuentes limpias, sino también por cambiar el modelo energético en vehículos. Hay que investigar y buscar alternativas a los motores de combustión interna que consumen refinados de petróleo. Estas investigaciones ya se están llevando a cabo y empiezan a aparecer nuevas tecnologías, como son los vehículos eléctricos.

Dicho esto, la tecnología del hidrógeno puede desempeñar un papel importante en la generación de energía y en la prevención del cambio climático. Es por esto por lo que a día de hoy algunas compañías apuestan estratégicamente por un futuro energético basado en dicho elemento.

## **1.2. Energías alternativas.**

En un sistema energético como el actual, que las principales fuentes de energía son los combustibles fósiles y la energía nuclear, y sabiendo que estos son finitos, es inevitable que en un determinado momento la demanda energética global no pueda ser abastecida y todo el sistema se colapse, produciéndose una crisis energética. Para

evitar esto, la solución es investigar y desarrollar nuevos métodos para obtener energía, las energías alternativas.

Las diferentes energías renovables son aquellas que se obtienen de fuentes naturales inagotables, ya sea porque son capaces de regenerarse por medios naturales o por el gran poder energético que contienen. Además durante el proceso de transformación de estas energías no se producen ningún tipo de residuos ni contaminantes.

El concepto de energía alternativa es similar pero no idéntico al de energía renovable. La alternativa, o fuente alternativa es aquella que puede suplir a las fuentes energéticas actuales, ya sea por su posibilidad de renovación o por su menos efecto contaminante. Según esta definición, algunos autores incluyen la energía nuclear dentro de las alternativas, ya que generan muy pocos gases de efecto invernadero.

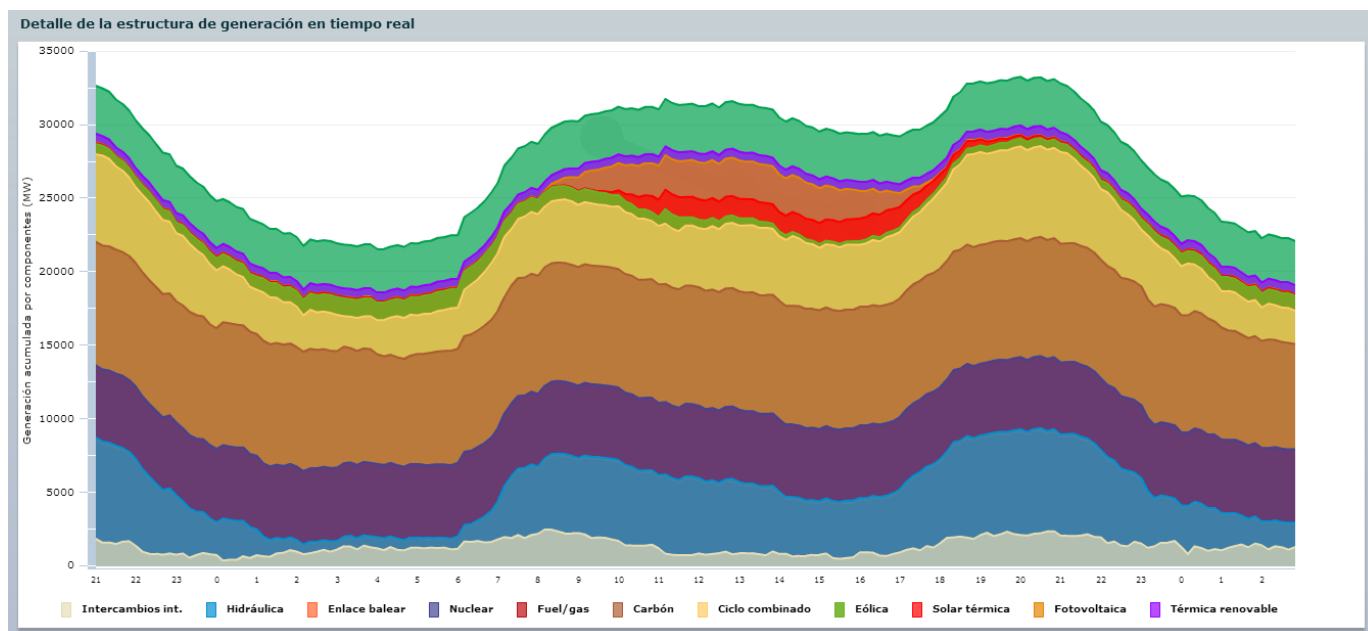
Son las energías renovables y la energía nuclear las soluciones de futuro y son dos culturas distintas de producir energía. Las primeras, son energías distribuidas por todo el territorio, con producción de baja intensidad, alternantes y de tecnologías relativamente sencillas. La segunda, la nuclear, es una energía que tiene que utilizarse de forma concentrada, con una producción lo más constante posible y con tecnología compleja. Ambos recursos primarios tienen una necesidad común: responder a las fluctuaciones de la demanda de forma eficiente. Si el futuro se orientase a las energías renovables, su propia aleatoriedad en su generación complicaría este ajuste, requiriendo el empleo de sistemas de almacenamiento energético más potentes y flexibles que los empleados en la actualidad.

La legislación española, a partir de la década de los 80 potenció un sector industrial de energías renovables que ha conseguido con dificultad un importante liderazgo a escala internacional, como queda de manifiesto en la energía eólica, y fotovoltaica y la termoeléctrica.

En la siguiente figura se puede ver en detalle la estructura de generación en tiempo real en España un día de Noviembre de 2015. Se puede apreciar la clara importancia de las centrales de carbón en el consumo energético (25-35%) y de las centrales de ciclo combinado (12-20%) seguido de la energía nuclear (15-25%). Hay que puntualizar



que la situación geográfica de la península ibérica favorece el aprovechamiento de los recursos renovables con mayor facilidad que otros países europeos.



*Figura 2: Demanda real de energía eléctrica en España. [Red Eléctrica española, 2015]*

### 1.3. El hidrógeno como solución universal.

Debido a la necesidad que existe actualmente de reducir el nivel de contaminantes presentes en la atmósfera, principales causantes de problemas que están afectando seriamente a la humanidad como el efecto invernadero y la variación de los regímenes climatológicos, surge la necesidad de buscar una fuente de energía limpia, renovable, con capacidad de contribuir a la demanda eléctrica, de fácil almacenamiento, sin introducir problemas medioambientales

Una buena solución es cambiar de base energética utilizando un combustible con el cual se puedan eliminar o reducir notablemente las emisiones de contaminantes a la atmósfera y, en este sentido, la propuesta más acertada es la utilización de hidrógeno como fuente de energía alternativa, que, siendo abundante en la naturaleza, su consumo sólo produciría agua, compuesto químico del cual se obtiene. Sin embargo, el hidrógeno no se encuentra en la naturaleza en estado puro y los

diversos métodos de conseguirlo requieren unas técnicas que consumen mucha energía.

El empleo del hidrógeno en forma molecular como portador y almacén energético no se ha planteado hasta la segunda mitad del siglo pasado, entre otras cosas por el desconocimiento de la electroquímica y por el insuficiente conocimiento de los materiales.

Si el objetivo es conseguir una economía basada en el hidrógeno para cumplir con los objetivos mediambientales de Kyoto, es necesario generar el hidrógeno de forma limpia e inagotable, pero la dificultad en la consecución del hidrógeno de manera masiva y no contaminante es precisamente uno de los principales obstáculos. Por ello, en la actualidad las investigaciones se centran en la búsqueda de un método que sirva para obtener hidrógeno de la manera más rápida y económica, puesto que su costosa producción resta beneficios a su uso como energía alternativa.

#### **1.4. Objetivo del proyecto.**

El objetivo de este proyecto es realizar un análisis comparativo de los sistemas de producción de hidrógeno, centrándonos en los métodos de producción a partir de fuentes renovables. Se pretende así estudiar y comparar el rendimiento de los métodos de producción y evaluar sus impactos económicos, sociales y medioambientales.

Los métodos de obtención de hidrógeno usando fuentes renovables que consideraremos en este estudio serán:

- Electrólisis del agua a alta temperatura.
- Electrólisis del agua a partir de energía solar para obtención de hidrógeno.
- Electrólisis del agua a partir de energía eólica para obtención de hidrógeno.
- Ciclos termoquímicos del agua.
- Obtención de hidrógeno a partir de biomasa.

## 2. El hidrógeno.

---

### 2.1. Retorno al pasado en busca de energía.

Siempre que se ha necesitado más energía, se ha recurrido a fuentes energéticas acumuladas en un pasado cada vez más remoto. Si tenemos en cuenta que el hidrógeno se formó en el instante de creación del universo, momento que se conoce como big bang, hace aproximadamente catorce mil millones de años, su uso significa liberar la energía acumulada durante la formación del universo.

Existe un acuerdo casi unánime a la hora de considerar que el hidrógeno será la fuente de energía del futuro, con lo que en el camino trazado por la humanidad en busca de fuentes energéticas, se habrá pasado de la energía acumulada en épocas recientes a la energía originada con la formación del universo y los hombres se habrán remontado hasta el principio del tiempo en busca de energía.

### 2.2. El hidrógeno, la fuente de energía alternativa del siglo XXI.

En nuestros días, existen numerosos proyectos de investigación que pretenden aprovechar la energía del hidrógeno e, incluso, diversos especialistas afirman que la economía se debe sustentar en tecnologías basadas en dicho elemento.

Existe una gran preocupación en el mundo económico, político y empresarial, debido a que la principal fuente energética actual, el petróleo, tiene los días contados. Sin esta materia prima no será posible producir electricidad ni los medios de automoción tendrán combustible, entre muchas otras cosas.

Por otra parte, el petróleo y los combustibles fósiles en general liberan monóxido y dióxido de carbono, agentes dañinos para la atmósfera, puesto que son causantes del efecto invernadero y su combustión produce sustancias altamente tóxicas.

El hidrógeno, por tanto, aparece como la tabla de salvación tanto del clima como de la economía y es el sustituto energético en el que los especialistas depositan más esperanzas.

A pesar de esto, también se reconoce que no existen minas de hidrógeno, sólo es posible obtener hidrógeno a partir de dos fuentes: el agua y los hidrocarburos mediante procesos que exigen una inversión de energía. Además, la extracción de hidrógeno a partir de hidrocarburos no representa una alternativa razonable al petróleo en la medida en que se están agotando y producen dióxido de carbono.

### 2.3. Propiedades del hidrógeno.

El hidrógeno es el elemento más abundante del universo, suponiendo más del 75% en masa y más del 90% en número de átomos. Bajo condiciones ordinarias en la Tierra, el hidrógeno existe como gas diatómico,  $H_2$ . Sin embargo, el hidrógeno gaseoso es extremadamente poco abundante en la atmósfera de la Tierra (1 ppm en volumen), debido a su pequeña masa que le permite escapar al influjo de la gravedad terrestre más fácilmente que otros gases más pesados. Aunque los átomos de hidrógeno y las moléculas diatómicas de hidrógeno abundan en el espacio interestelar, son difíciles de generar, concentrar y purificar en la Tierra. El hidrógeno es el decimoquinto elemento más abundante en la superficie terrestre. La mayor parte del hidrógeno terrestre se encuentra formando parte de compuestos químicos tales como los hidrocarburos o el agua. El hidrógeno gaseoso es producido por algunas bacterias y algas, y es un componente natural de las flatulencias. El metano es una fuente de enorme importancia para la obtención del hidrógeno.

El hidrógeno es un elemento químico representado por el símbolo H y con un número atómico de 1. En condiciones normales de presión y temperatura, es un gas diatómico ( $H_2$ ) incoloro, inodoro, insípido, no metálico y altamente inflamable. Con una masa atómica de 1,00794(7) u, el hidrógeno es el elemento químico más ligero.

El hidrógeno elemental es muy escaso en la Tierra y la mayor parte del hidrógeno elemental se obtiene 'in situ', es decir, en el lugar y en el momento en el que se necesita.

El hidrógeno puede formar compuestos con la mayoría de los elementos y está presente en el agua y en la mayoría de los compuestos orgánicos. Desempeña un papel particularmente importante en la química ácido-base, en la que muchas reacciones conllevan el intercambio de protones (iones hidrógeno,  $H^+$ ) entre moléculas solubles. Puesto que es el único átomo neutro para el cual la ecuación de Schrödinger puede ser resuelta analíticamente, el estudio de la energía y del enlace del átomo de hidrógeno ha sido fundamental para el desarrollo de la mecánica cuántica.

Sólo hay un elemento en la tabla periódica que no pertenece a ningún grupo en particular: el hidrógeno. Este elemento tiene una química singular. Además sus tres isótopos difieren tanto en sus masas moleculares que las propiedades físicas y químicas son sensiblemente diferentes.

Propiedades y características del Hidrógeno	
Símbolo químico	H
Estado ordinario	Gas
Serie química	No metales
Número atómico	1
Masa Atómica	1,0079 g/mol
Grupo	<u>1</u>
Periodo	<u>1</u>
Aspecto	Incoloro
Bloque	<u>s</u>
Densidad	0.0899 kg/m <sup>3</sup>
Radio medio	25 pm
Radio atómico	53 pm
Radio covalente	37 pm
Radio de van der Waals	120 pm
Configuración electrónica	1s1
Electrones por capa	1
Estados de oxidación	1, -1
Óxido	Anfótero
Estructura cristalina	Hexagonal
Punto de fusión	14.025 K
Punto de ebullición	20.268 K
Punto de inflamabilidad	255 K
Calor de fusión	0.05868 kJ/mol
Presión de vapor	209 Pa a 23 K
Temperatura crítica	23,97 K
Presión crítica	1,293x10 <sup>6</sup> Pa
Volumen molar	22,42x10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /mol
Electronegatividad	2,2 (Pauling)
Calor específico	1,4304·10 <sup>4</sup> J/(K·kg)
Conductividad térmica	0,1815 W/(K·m)

Figura 3: Tabla de propiedades y características del hidrógeno. [www.elementos.org]

## 2.4. Aplicaciones del hidrógeno.

El mercado actual del hidrogeno está sufriendo una profunda revisión, pues el H apunta como piedra angular en el panorama energético futuro. La pésima predicción de las reservas de combustibles fósiles así como el progresivo efecto invernadero esta gestando un cambio de mentalidad industrial y política. La flexibilidad de este “nuevo producto” en el mercado no solo está suscitando una pugna entre las empresas del sector energético por decantar el futuro a su favor sino que tiene a gran parte del resto de sus consumidores, como el transporte, donde sólo en Europa uno de cada doce puestos de trabajo está relacionado con la automoción.

Se producen cada año aproximadamente 400.000 millones de metros cúbicos de hidrógeno, lo que supone un potencial energético equivalente al 10% del petróleo consumido. La mayor parte es producida y utilizada por la industria petroquímica y por la de abonos nitrogenados.

Además, se emplea en la industria espacial. Normalmente se obtiene a partir del metano, pero para muchos la técnica más prometedora es la electrólisis del agua, aunque sólo el 4% del hidrógeno se produce con esta técnica.

### 2.4.1. Usos convencionales del hidrógeno.

El hidrógeno se emplea en un gran número de aplicaciones industriales. Dentro de la industria, los mayores consumidores son las empresas que sintetizan amoníaco, seguido de las refinerías de petróleo y las plantas de producción de metanol. El resto está repartido en la industria farmacéutica, de alimentación, electrónica, etc. Sin embargo, en los últimos años ha tomado una relevancia añadida el hecho de que el hidrógeno pueda ser el portador energético del futuro.

#### 2.4.1.1. *Hidrógeno en la industria química.*

El hidrógeno es un compuesto de gran interés para la industria química, participando en reacciones de adición en procesos de hidrogenación o como agente reductor en procesos de reducción. Algunos de los procesos más importantes en lo que participa son los siguientes.

- Síntesis de amoníaco: el amoníaco se obtiene por la reacción catalítica entre nitrógeno e hidrógeno, el cual, para el mercado del amoníaco es esencialmente generado in situ por el fabricante.
- Procesos de refinería: los procesos de hidrogenación en refinería tienen como objetivo principal la obtención de fracciones ligeras de crudo a partir de fracciones pesadas, aumentando su contenido en hidrógeno y disminuyendo su peso molecular. De forma simultánea pueden eliminarse elementos indeseados como azufre, nitrógeno y metales.
- Tratamiento de carbón: mediante el tratamiento de carbón en presencia de hidrógeno, en diferentes condiciones de presión y temperatura, pueden obtenerse productos líquidos y/o gaseosos mediante diferentes procesos (hidrogenación, hidropirólisis y gasificación hidrogenante).
- Aprovechamiento del gas de síntesis: la producción de hidrógeno a partir de hidrocarburos conduce a una mezcla de gases formada principalmente por hidrógeno y monóxido de carbono. Esta mezcla de gases se denomina Gas de Síntesis debido a su empleo en procesos de síntesis de productos químicos especiales, como por ejemplo la síntesis de metanol, síntesis de Fisher-Tropsch, hidroformilación de olefinas (síntesis oxo) y síntesis de metano y etileno, entre otras.
- Síntesis orgánica: en química orgánica el hidrógeno participa en un gran número de procesos de hidrogenación o reducción para la obtención de productos químicos e intermedios.
- Síntesis inorgánica: el hidrógeno es imprescindible en procesos de importancia comercial como por ejemplo la producción de ácido clorhídrico, peróxido de hidrógeno, hidroxilaminas, etc.

#### **2.4.1.2. Hidrógeno en la industria metalúrgica.**

En la industria siderúrgica, el mineral de hierro puede ser reducido empleando coque o un gas que contenga hidrógeno, monóxido de carbono, o mezclas de estos. Este gas reductor puede obtenerse mediante reformado con vapor de agua u oxidación parcial de combustibles fósiles. Además, en la industria metalúrgica, el hidrógeno se emplea



como agente reductor y en procesos de producción de otros metales no férricos como por ejemplo, cobre, níquel, cobalto, molibdeno, uranio, etc.

#### **2.4.1.3. Otros usos.**

- Combustible aeroespacial: además de servir como suministro de energía para los ordenadores y sistemas de soporte en el espacio, obteniendo agua como subproducto.
- Llamas a alta temperatura: la combustión de una mezcla estequiométrica de hidrógeno y oxígeno conduce a temperaturas de llama comprendidas entre 3000 y 3500 K, las cuales pueden ser usadas para corte y soldadura en la industria del metal, crecimiento de cristales sintéticos, producción de cuarzo, etc.
- Plasma de hidrógeno: el elevado contenido calorífico de un plasma de hidrógeno puede ser utilizado en algunos procesos de producción.
- Procesamiento de metales: es habitual añadir diferentes proporciones de hidrógeno a las corrientes gaseosas empleadas en diferentes procesos de corte y soldadura, tratamientos superficiales (atomización) y tratamientos en atmósferas especiales (templado, sinterización, fusión, flotación de vidrio, etc).
- Producción de semiconductores: para producir semiconductores dopados se depositan en una matriz de silicio ciertas cantidades de trazas de elementos (Si, As, Ge, etc.) en forma de hidruros, mezclados con una corriente de hidrógeno de elevada pureza.
- Tratamiento de agua: los contenidos demasiado elevados de nitratos en aguas potables pueden ser reducidos por desnitrificación en bioreactores, en lo que las bacterias emplean el hidrógeno como fuente de energía.
- El hidrógeno se emplea también para aumentar la temperatura de transición de aleaciones superconductoras, así como gas portador y combustible en cromatología gaseosa. El hidrógeno líquido se usa como refrigerante, por ejemplo para enfriar metales superconductores a temperaturas inferiores a las de transición.

## 2.4.2. Usos energéticos del hidrógeno.

### 2.4.2.1. *El hidrógeno como combustible.*

#### ***Evolución de los combustibles:***

Las fuentes de energía empleadas han ido variando a lo largo del tiempo con el fin de disminuir la producción de carbono como subproducto. Así, por ejemplo:

- La madera ha sido una fuente de energía primaria durante varios milenios y fue sustituida por el carbón a finales del siglo XIX por poseer mayor densidad de energía.
- La utilización de petróleo aumentó durante el siglo XX, superando al carbón en la década de 1960. Hoy en día se está incrementando el uso de gas natural como fuente de energía.

Dicha variación de las fuentes de energía en la historia supone una producción de menos CO<sub>2</sub> por unidad de energía, sin embargo, el consumo mundial de energía se ha incrementado más rápidamente. Este factor, junto al hecho de que los combustibles fósiles son finitos, conlleva a considerar otras fuentes de energía como puede ser el hidrógeno.

#### ***Cronología del hidrógeno:***

1766: Cavendish descubre aire inflamable.

1781: Cavendish descubre que el aire inflamable arde con el oxígeno para formar agua. Lavoisier lo bautiza como hidrógeno.

1839: Grove descubre la reacción electroquímica en la que se basan las pilas de combustible.

1898: Dewar licua hidrógeno por primera vez.

1920: comienza la producción industrial de hidrógeno.

1935: Bacon construye el primer modelo de pila de combustible.

1962: la NASA introduce las pilas de combustible en misiones espaciales.

1970: Kordesh construye el primer coche con hidrógeno y pila de combustible.

1977: se inicia el programa de hidrógeno de la Agencia Internacional de la Energía.

2002: Se crea el Grupo de Alto Nivel en Europa.

2003: Se firma el 'International Partnership on Hydrogen Economy'.

A finales del siglo XVIII se descubren los principales gases; Henry Cavendish (1731-1810) fue el primero en distinguir la presencia de dióxido de carbono e hidrógeno en el aire, lo que lo llevó en 1766 a publicar 'Experiments on factitious Air', donde demostró la importancia de los experimentos efectuados: el hidrógeno fue aislado, estudiado y propuesto como combustible.

#### ***2.4.2.2. El hidrógeno como vector energético.***

La economía del hidrógeno es un sistema que utiliza el hidrógeno como medio de transporte de energía en el ciclo de abastecimiento energético. El hidrógeno se trata como vector energético puesto que este no es una fuente de energía en sí, sino que se obtiene a partir de alguna fuente de energía o del agua. Como combustible puede emplearse en diversidad de aplicaciones como por ejemplo en automoción o produciendo electricidad, generando agua como único residuo. Por otro lado, las pilas de combustible son dispositivos que convierten la energía química de un combustible, en este caso hidrógeno, en energía eléctrica, sin generar contaminantes durante el proceso y con una buena eficiencia. Por ello, la combinación de hidrógeno y pilas de combustible responde a la tendencia hacia sistemas energéticos sostenibles, autosuficientes y no contaminantes. Debido a la magnitud del cambio tecnológico que supone, se ha llegado a afirmar que representan la tercera revolución industrial.

Entre las propiedades que hacen del hidrógeno un candidato ideal para resolver el problema de la energía del futuro, se pueden destacar las siguientes:

- El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo, aunque no se encuentra libre en la naturaleza sino que se encuentra ligado en compuestos químicos.

- Se puede obtener a partir de multitud de fuentes.
- El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro, no tóxico y el más ligero de todos los compuestos. El contenido energético por unidad de peso es el más elevado comparado con cualquier combustible conocido.
- El producto de la utilización del hidrógeno como fuente de energía es el agua, por lo que no existen emisiones contaminantes.
- La conversión hidrógeno-electricidad tiene lugar con una elevada eficiencia, debido a que no está limitada por el ciclo de Carnot.

#### ***2.4.2.3. El hidrógeno como portador de energía.***

El hidrógeno no es una fuente de energía, excepto en el hipotético contexto de las plantas comerciales de fusión nuclear alimentadas por deuterio o tritio, una tecnología que actualmente se encuentra en desarrollo en el reactor experimental ITER. La energía del Sol proviene de la fusión nuclear del hidrógeno, sin embargo, es un proceso complicado de conseguir en la Tierra. El hidrógeno elemental obtenido de fuentes solares, biológicas o eléctricas cuesta mucha más energía para producirlo de la que se obtiene de su combustión. El hidrógeno puede generarse a partir de fuentes fósiles (como el metano) gastando menos energía de la que se obtiene, pero se trata de fuentes no renovables que, además son fuentes energéticas por sí mismas.

El hidrógeno puede quemarse directamente para la generación de electricidad mediante turbinas de gas y ciclos combinados o directamente como combustible de motores. Las principales ventajas de este compuesto se centran en las elevadas eficacias que pueden alcanzarse y en que el único producto de su combustión es vapor de agua, estando exento de NOx, si se controla la temperatura para inhibir la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno atmosféricos, y de CO2, evitando la contribución al calentamiento global.



*Figura 4: Ciclo energético del hidrógeno. [Centro Nacional del Hidrógeno, CNH]*

#### 2.4.2.4. El hidrógeno y las pilas de combustible.

Más que en el uso directo del hidrógeno como combustible, la revolución energética que supone la economía del hidrógeno se basa en el uso de este gas por medio de las llamadas pilas de combustible.

Las células o pilas de combustible son dispositivos que permiten la conversión de la energía química de una sustancia en energía eléctrica y calor mediante un proceso electroquímico. Esta transformación utiliza directamente la energía libre disponible en el combustible a su temperatura de operación y no está limitada por el ciclo de Carnot, alcanzando rendimientos superiores a los procesos convencionales. El cambio en la energía libre de Gibbs de la reacción está relacionada con el voltaje de la pila según:

$$\Delta G = n \cdot F \cdot \Delta V$$

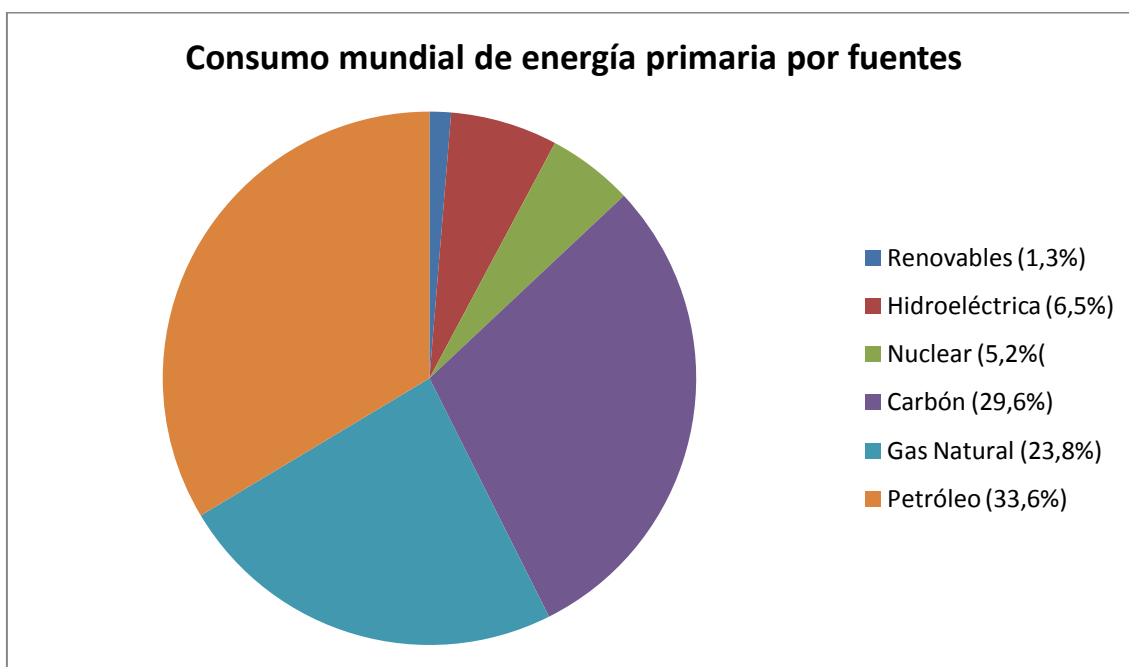
Donde  $n$  es el número de electrones implicados en la reacción y  $\Delta V$  es el voltaje generado.

En las pilas se pasa directamente de energía química a eléctrica sin las conversiones intermedias de energía térmica o mecánica propias de los procesos convencionales.

## 3. Producción de hidrógeno.

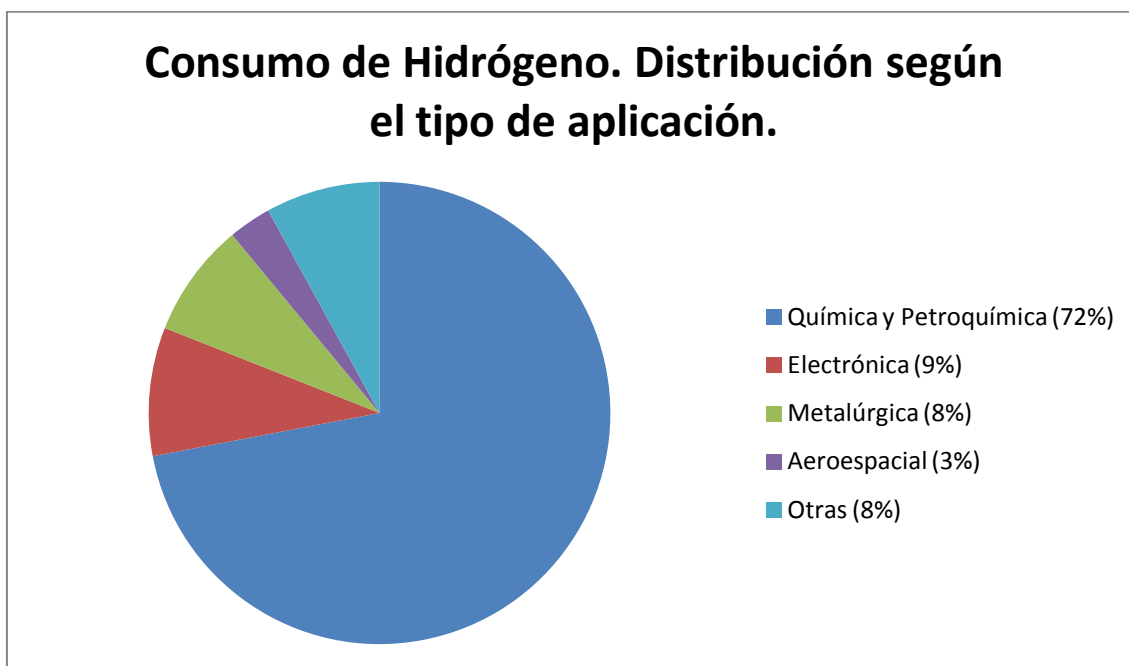
### 3.1. Cifras sobre producción de hidrógeno.

La producción actual de hidrógeno en el mundo supera los 35 millones de toneladas al año. Las principales materias primas utilizadas son los combustibles fósiles, y el único proceso que no está basado en estos compuestos es la electrólisis del agua, por el cual se obtiene un 4% de la producción actual, mientras que a partir de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) se obtiene el 96% restante.



*Figura 5: Consumo mundial de energía primaria por fuentes. [3]*

La producción de hidrógeno se destina en su mayor parte a fines industriales; en aplicaciones químicas, principalmente amoníaco, y petroquímicas. Esto supone el 72% de la producción mientras que el resto se emplea en metalurgia, en electrónica y en la propulsión de vehículos espaciales. La producción de hidrógeno a partir de electrólisis del agua se emplea en la industria alimentaria, en alimentos hidrogenados.



*Figura 6: Consumo de hidrógeno, distribución según el tipo de aplicación. [3]*

### 3.2. Sistemas de producción.

Para estudiar los distintos métodos de producción de hidrógeno, tenemos que considerar dos clasificaciones:

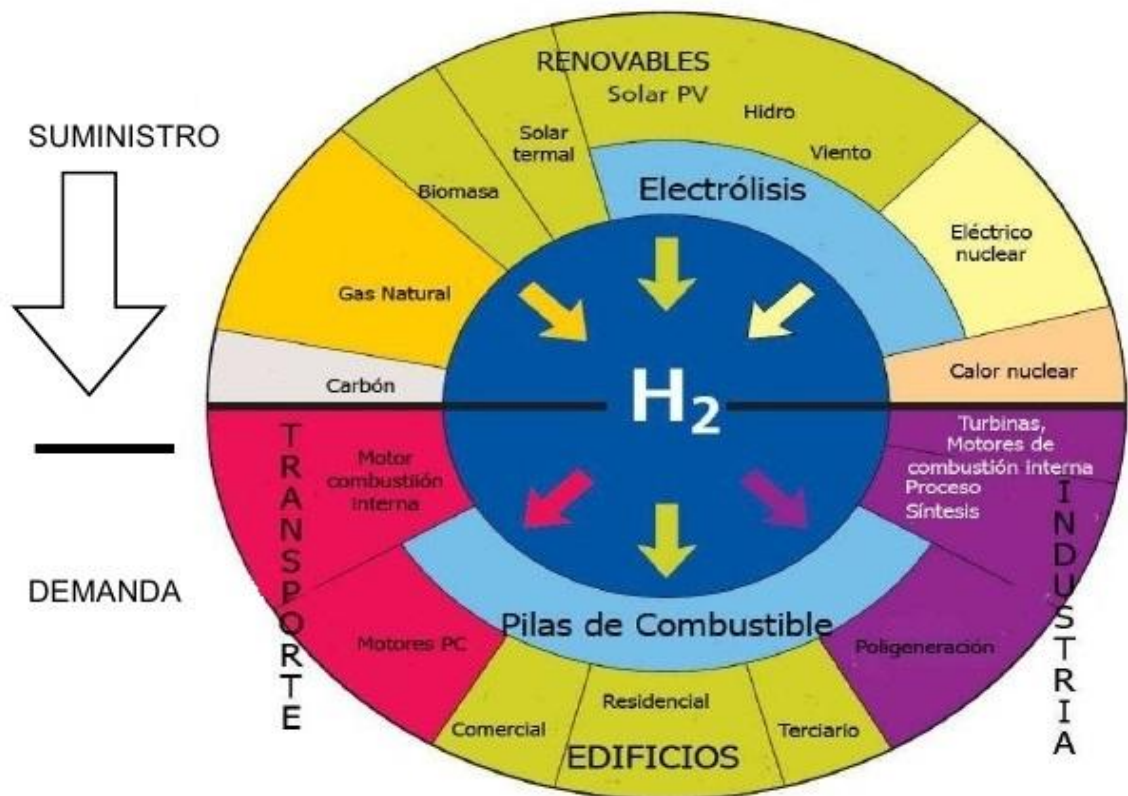
- a partir de la materia prima empleada para su obtención.
- a partir de la fuente de energía utilizada para su obtención.

En este proyecto consideraremos el primer tipo de clasificación.

Como ya se ha mencionado anteriormente, el hidrógeno debe obtenerse mediante la separación de los elementos de otras sustancias existentes en la naturaleza. Así, se puede obtener hidrógeno a partir de las siguientes materias primas:

- Combustibles fósiles.
- Agua.
- Biomasa.

En la actualidad, los principales métodos de producción de hidrógeno son aquellos que utilizan combustibles fósiles como materia prima, y en menor medida, la electrólisis del agua, la cual se puede llevar a cabo a partir de diversas fuentes de energía. Por ello, para tener una fuente de energía limpia debe fomentarse la producción de hidrógeno a partir del agua.

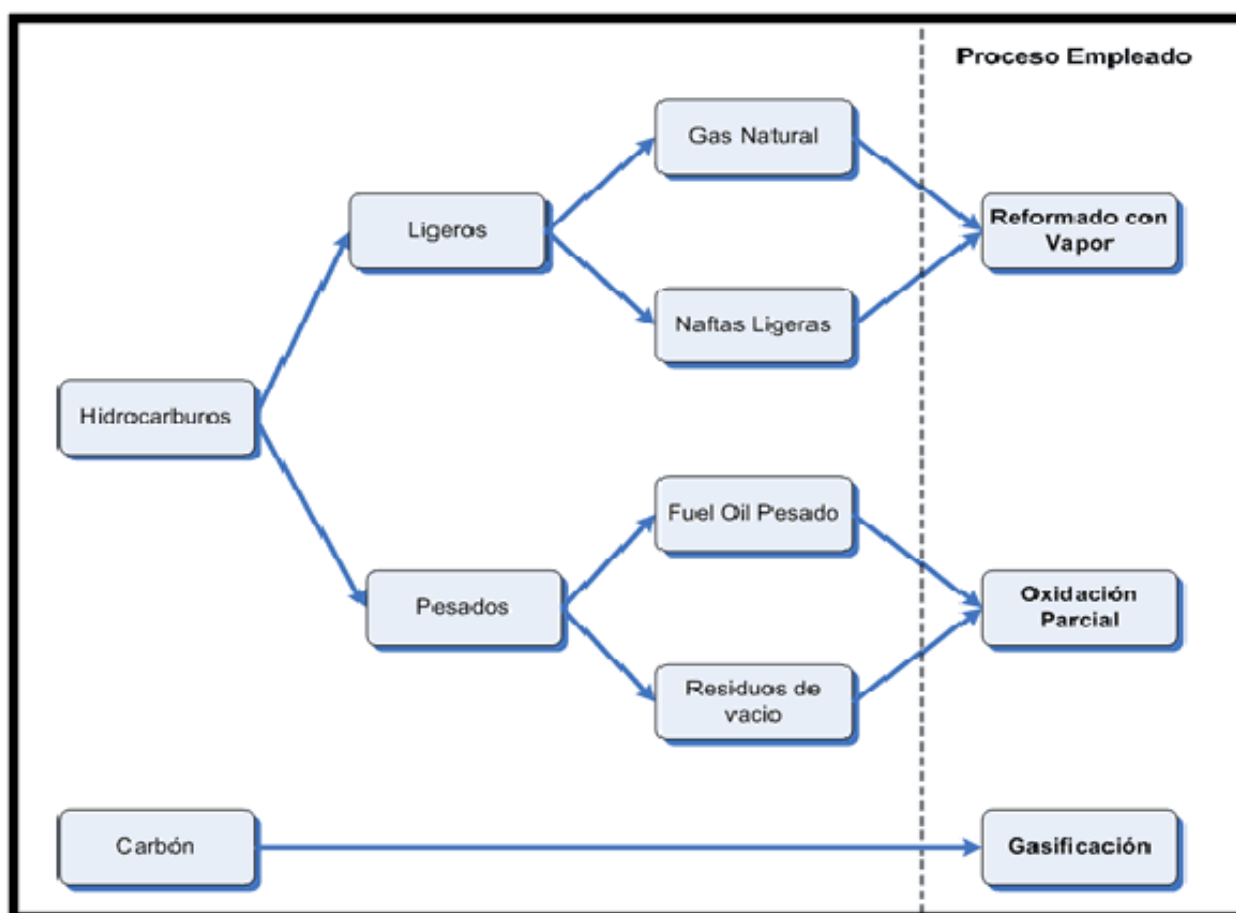


*Figura 7: Suministro y demanda de hidrógeno. [Comisión Europea, 2003]*

### 3.2.1. Obtención a partir de combustibles fósiles.

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos formados únicamente por átomos de carbono e hidrógeno. La estructura molecular consiste en un armazón de átomos de carbono a los que se unen los átomos de hidrógeno. Las cadenas de átomos de carbono pueden ser lineales o ramificadas y abiertas o cerradas.





*Figura 8: Proceso empleado para la obtención de hidrógeno a partir de combustibles fósiles. [15]*

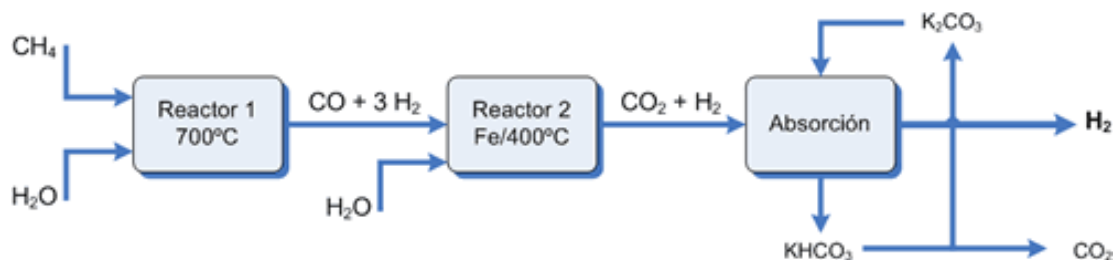
Fuertemente simplificado, la mayoría de procesos descritos a continuación se basan en calentar algún hidrocarburo, vapor y en algunos casos aire u oxígeno, los cuales son posteriormente combinados en un reactor.

Bajo este proceso, la molécula de agua y la materia prima son separadas, y el producto resultante es  $H_2$ ,  $CO$  y  $CO_2$ . En otras palabras, el gas hidrógeno obtenido proviene tanto del vapor como de la composición del hidrocarburo. Otro método consiste en calentar el hidrocarburo en ausencia de aire hasta que este se separe en hidrógeno y carbono.

#### *3.2.1.1. Reformado mediante vapor.*

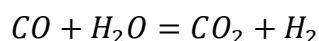
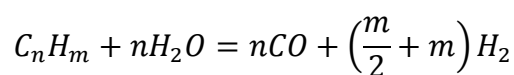
Actualmente se trata del método más económico y común de producir hidrógeno, por lo que a día de hoy aproximadamente la mitad del hidrógeno producido en el mundo se obtiene a través de este método. Se llama proceso de reformado a la reacción

catalítica de una mezcla de vapor de agua e hidrocarburos a una temperatura más o menos alta para formar hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono.



*Figura 9: Esquema del proceso de reformado mediante vapor. [15]*

Las reacciones básicas y más usadas industrialmente son:



Para el procedimiento de reformado mediante vapor los combustibles que mejor responden a la reacción son los hidrocarburos ligeros, entre ellos el gas natural, el propano y el butano. También puede usarse nafta con el empleo de un catalizador adecuado.

El uso de estos hidrocarburos ligeros es debido a que el procedimiento debe llevarse a cabo con el combustible en estado gaseoso y libre de impurezas que pudieran desactivar los catalizadores, por ejemplo el azufre.

Así pues, en primer lugar se realizará una purificación de la materia base, mediante un proceso de desulfurizado.

Seguidamente, se produce una primera reacción en hornos tubulares a una temperatura de 800-900°C y una presión de 20-25 bar, de donde se obtiene un gas rico en dióxido de carbono e hidrógeno, y en menor cantidad monóxido de carbono. Dicha reacción es endotérmica.

A continuación de la primera reacción, se elimina el dióxido de carbono por medio de reacciones de cambio de alta a baja temperatura a 400 y 200°C respectivamente y se produce una mezcla gaseosa de H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y un poco de CO y CH<sub>4</sub>.

Esta segunda reacción es exotérmica pero no puede aportar energía suficiente que requiere la primera, así que se usa metano como reactivo y combustible para aportar la energía que falta.

Finalmente, este gas resultante rico en hidrógeno se separa del agua mediante condensación y se purifica mediante sistemas de membranas separadoras, llamado PSA “Pressure Swing Adsorption”, de donde sale un hidrógeno puro al 99,99%, cuyo contenido energético es mayor al del hidrocarburo del cual procede.

Como catalizadores se utiliza níquel para la reformación vapor-hidrocarburo y óxido de hierro para la reacción del CO.

### *3.2.1.2. Gasificación del carbón.*

La gasificación del carbón es el proceso que se usa para producir un gas a partir del carbón, un llamado gas de síntesis (formado por una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno, entre otros), a partir del carbón sólido. Este es el primer método empleado para la producción de hidrógeno.

El proceso de gasificación consiste en la inyección del carbón con oxígeno y vapor de agua en una instalación llamada gasificador, con una cierta temperatura de 700 y 1500°C. Si el carbón es calentado mediante fuentes de calor externas el proceso se llama ‘gasificación alotérmica’ y si se calienta simplemente mediante la reacción exotérmica de la reacción química se denomina ‘gasificación autotérmica’.

El proceso que se produce en el gasificador es esencialmente una combustión con defecto de aire (10% a 50% estequiométrico). Durante las reacciones mencionadas, el oxígeno y las moléculas de agua oxidan el carbón y producen una mezcla gaseosa de dióxido de carbono, monóxido de carbono, vapor de agua e hidrógeno molecular (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>). El producto final es ‘syngas’, que en la mayoría de los casos es refinado aún más para obtener una mayor cantidad de hidrógeno puro.

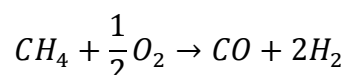
El proceso para la obtención de hidrógeno mediante este gas de síntesis es el reformado mediante vapor de agua convencional.

Precisamente la gasificación de carbón con captura de CO<sub>2</sub> es una de las técnicas que despiertan mayor interés, tanto en la Unión Europea como en Estados Unidos, debido a que el recurso se halla muy repartido y a que cuando se integra esta técnica en ciclo

combinado (GICC) se pueden producir de manera simultánea hidrógeno y electricidad, derivando la producción hacia el vector energético que más interese.

#### **3.2.1.3. *Procesos de oxidación parcial de hidrocarburos.***

Este proceso se denomina POX y consiste en oxidar el CH<sub>4</sub> de manera parcial (sin que se oxide en su totalidad), siguiendo la reacción:



La principal ventaja de este procedimiento es su compatibilidad con hidrocarburos líquidos, como diesel y fuel oil.

Existen dos tipos de oxidación parcial:

- Oxidación parcial térmica (TPOX)
- Oxidación parcial catalítica (CPOX)

Las reacciones TPOX son dependientes de la proporción aire-combustible, y se llevan a cabo a unas temperaturas de 1200°C o superiores. Mientras que en las CPOX se usa un catalizador que reduce la temperatura requerida alrededor de los 800-900°C.

La elección de una u otra técnica depende de los contenidos de azufre que contiene el combustible a usar. CPOX se puede usar si el contenido de azufre es inferior a las 50 ppm.

Si el contenido en azufre es mayor, este contaminaría el catalizador, así que se usará el procedimiento térmico (TPOX) para los combustibles ricos en azufre.

Dicha reacción se lleva a cabo con una eficiencia de alrededor del 70%. La presencia del CO no es conveniente, así que se oxida para convertirlo en CO<sub>2</sub> o tratándolo con vapor de agua para generar más hidrógeno. Dado que la reacción es exotérmica no hacen falta quemadores para mantenerla.

Se trata de un procedimiento adecuado para obtener hidrógeno en vehículos equipados con una pila de combustión. Sólo se necesita un depósito o tanque con gas natural. El inconveniente añadido, es que para cada pila, el hidrógeno ha de ser bastante puro.

El 96% del hidrógeno producido se obtiene de combustibles fósiles, principalmente a partir del reformado por vapor del gas natural. Además, el 95% de la producción de

hidrógeno es cautiva, es decir, lo produce la misma instalación que lo va a consumir, sin necesidad de red de distribución a usuarios finales.

Evidentemente, si se pretende que el hidrógeno acabe siendo el soporte futuro del desarrollo, es preciso que el escenario actual de producción y distribución cambie considerablemente.

### 3.2.2. Obtención a partir de agua.

Los procesos de obtención de hidrógeno que hasta ahora hemos analizado, es decir la obtención de hidrógeno a partir de combustibles fósiles, no pueden soslayar el hecho de que intrínsecamente generan CO<sub>2</sub>, trasladando el problema ambiental, en cierta medida, aguas arriba en la cadena de suministros del combustible. Por otro lado, durante varios años, este H<sub>2</sub> producido por reformado de hidrocarburos competirá con la utilización de los mismos para sus usos tradicionales en transporte y petroquímica.

Sin embargo, existe otra opción de obtención de hidrógeno donde se utiliza agua como fuente primaria principal. En este caso la tarea consiste en separar la molécula de agua en sus elementos constitutivos hidrógeno y oxígeno. Para llevar a cabo esta reacción se requiere obviamente energía y las opciones de procesos son variadas.

En primer lugar la ruptura de la molécula de agua puede realizarse simplemente utilizando alta temperatura para romper el enlace puente hidrógeno de la molécula de agua. Este proceso se conoce como termólisis del agua y se lleva a cabo a una temperatura de 4300°C que es la temperatura a la cual se rompe en forma espontánea el enlace hidrógeno-oxígeno. Otra opción es utilizar electricidad para romper la molécula de agua, este proceso es comúnmente conocido como electrólisis. La utilización de electricidad para romper la molécula de agua permite llevar a cabo la reacción a temperaturas más moderadas que la termólisis e incluso existe una serie de procesos en los cuales se combinan la electricidad y temperatura para la ruptura de la molécula de agua.

Existe otra forma de obtención de H<sub>2</sub> que no utiliza, al menos en forma exclusiva, calor ni electricidad. Estos procesos obtienen el hidrógeno a partir de un ciclo de reacciones químicas en las cuales interviene algún elemento inorgánico como catalizador de la

reacción. Estos procesos se conocen como ciclos termoquímicos. Si bien la carga calórica es importante en este tipo de procesos no es tan intensiva como la termólisis por calor. La menor utilización de calor se basa en una serie de reacciones entre un elemento inorgánico (que puede ser metálico o no metálico) y el agua, pasando por compuestos intermedios como ácidos, que son los que liberan el hidrógeno en reacciones de regeneración de estos elementos inorgánicos. Si bien la necesidad de calor de estos procesos es menor que la termólisis, el consumo de calor es aún elevado, necesitándose temperaturas entre 500 y 800°C para su realización. Este rango de temperaturas puede ser cubierto por fuentes de energía tales como la energía solar o la energía nuclear de última generación.

#### **3.2.2.1. *Procesos electroquímicos-Electrólisis.***

La electrólisis del agua es uno de los procedimientos más limpios, además de los más simples e intuitivos, para obtener hidrógeno. Este proceso, descubierto por M. Faraday en 1820, consiste en descomponer el agua en sus componentes constituyentes, hidrógeno y oxígeno mediante un aporte energético, la electricidad.

Dicha corriente eléctrica puede proceder de fuentes renovables como no renovables. Evidentemente, si se utilizaran energías no renovables como combustibles fósiles no se presentaría como la mejor opción, puesto que mediante procesos de reformado de hidrocarburos los rendimientos son mucho mayores y de menor coste.

Así pues, la electrólisis se presenta como un proceso de obtención de hidrógeno cuya principal ventaja sería su posibilidad de combinarse con las energías renovables, de tal manera que mediante la energía renovable se obtuviera la electricidad necesaria para la electrólisis de una forma, además, rentable.

Conjuntamente a esto, el uso simultáneo de energías renovables permitiría la obtención de un combustible benigno para el medio ambiente a través de un proceso limpio, a diferencia de cómo pasaría con el reformado de hidrocarburos, que para dicha obtención se liberarían emisiones a la atmósfera.

El principio de funcionamiento de la electrólisis es conectar una fuente eléctrica a dos electrodos, comúnmente de algún metal como platino o acero inoxidable, que se

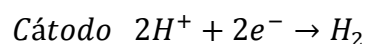
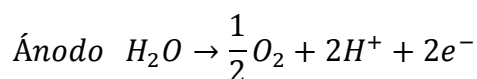
encuentran sumergidos en el agua que actúa como electrolito facilitando la migración de los iones.

En una celda electrolítica típica el hidrógeno aparecerá en el cátodo (electrodo positivo), mientras que el oxígeno aparecerá en el ánodo (electrodo negativo).

\*En un dispositivo que consume energía el ánodo es positivo, y en un dispositivo que proporciona energía el ánodo es negativo. De igual forma, en un dispositivo que consume energía el cátodo es negativo, y en un dispositivo que proporciona energía el cátodo es positivo.

Si se asumiera un rendimiento ideal, la cantidad de hidrógeno generado sería el doble que la cantidad de oxígeno, y ambas cantidades serían proporcionales a la carga eléctrica conducida por la solución.

La electrólisis suele llevarse a cabo a temperaturas entre 80-85°C y la reacción electroquímica que se da en el proceso de separación del agua en sus componentes es:



Este proceso tiene una eficiencia de entre el 50 y el 75%, aunque existe un tipo de electrólisis llamada gravitacional que trabaja con rendimientos del 85 al 95%.

La electrólisis constituye sólo un 4% de la producción de hidrógeno, aunque la pureza es mayor del 99%.

#### *Electrólisis a baja temperatura.*

---

##### ➤ **Fotoelectrólisis:**

##### ***Producción de hidrógeno a partir de energía solar:***

El vector energético hidrógeno producido a partir de energías renovables está adquiriendo cada vez más protagonismo y, dentro de ese campo, el hidrógeno

producido con energía solar se presenta como una manera adecuada de almacenar, en forma de energía química, la energía procedente del sol. Con ello se consigue subsanar uno de los principales obstáculos para el aprovechamiento de la energía solar, su carácter intermitente, ya que, aunque existen métodos de almacenamiento de dicha energía, todos ellos presentan muy bajo rendimiento.

Los métodos para producir hidrógeno con energía solar se agrupan en tres grandes conjuntos: procesos fotoquímicos, electroquímicos y termoquímicos, aunque también existen combinaciones de los anteriores. De estos tres procesos, los que han tenido un mayor desarrollo técnico-económico, son los electroquímicos, que son los que analizamos en este apartado y los termoquímicos, los cuales trataremos en siguientes apartados.

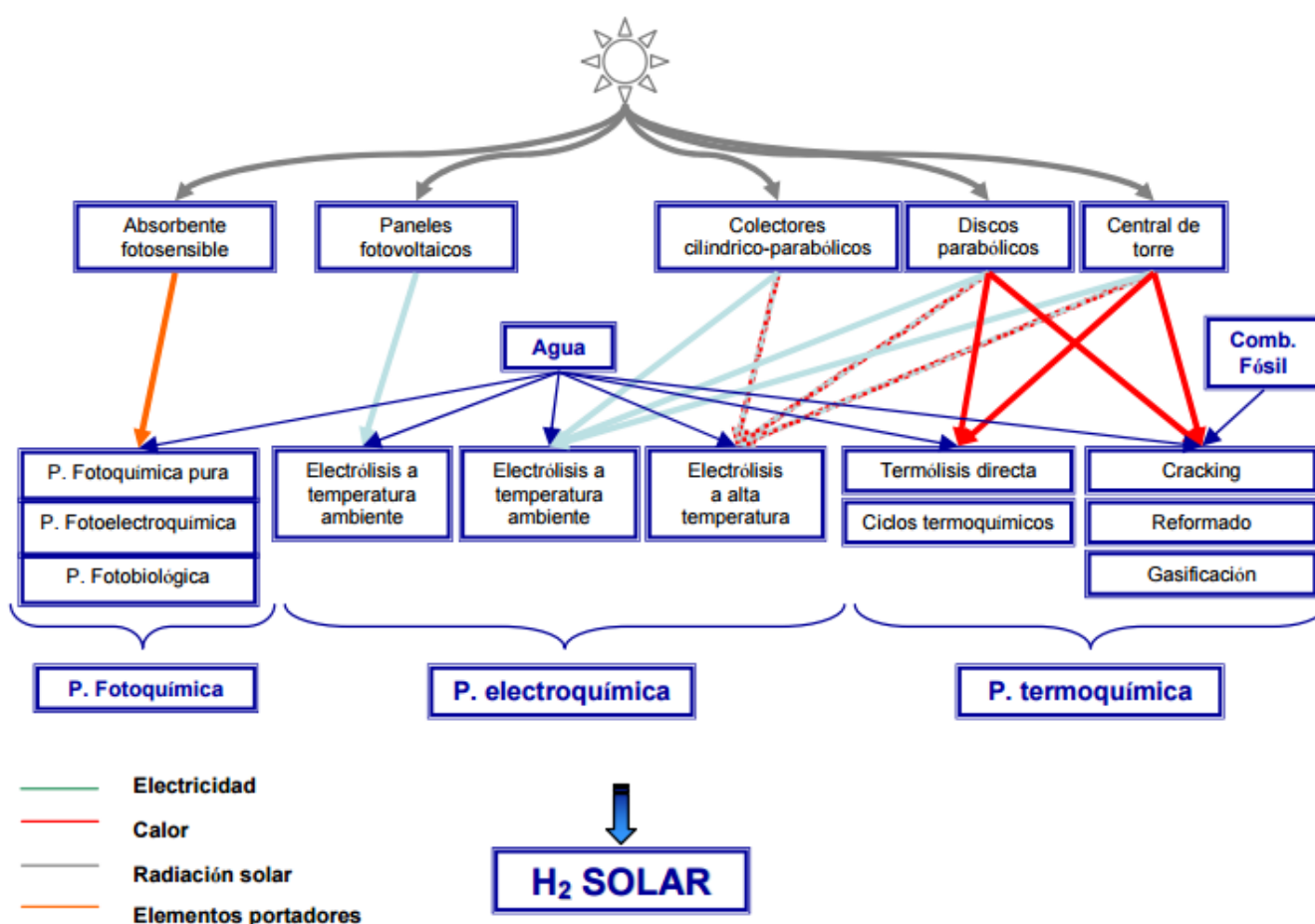


Figura 10: Métodos de producción de hidrógeno solar. [19]



Existen dos métodos de producción de energía eléctrica por vía solar. El primero sería la energía solar fotovoltaica y el segundo sería utilizar la energía solar térmica de alta temperatura, para calentar un fluido térmico hasta una temperatura suficiente como para que pueda ser introducido en una turbina para la producción de energía eléctrica.

La energía solar fotovoltaica es aquella que utiliza la radiación solar para excitar una célula solar fotovoltaica, compuesta por un material fotoexcitable, de modo que se produce una diferencia de potencial entre distintas partes del material. Una célula solar puede estar compuesta por diferentes materiales. Las células que más se utilizan son las que tienen como material fundamental el silicio. Pero es necesario dopar a las células con fósforo y con boro. Pero dentro de las de silicio las podemos encontrar de silicio monocristalino, de silicio policristalino y de silicio amorfo. Las dos primeras son más comerciales. Las de silicio monocristalino tienen una eficiencia mejor y son algo más caras que las de policristalino que tienen algo menos de eficiencia pero son más baratas.

Los procesos fotoelectroquímicos consisten en emplear la energía eléctrica proveniente de un módulo fotovoltaico, para alimentar un electrolizador, con el objetivo de fomentar una reacción no espontánea y de esta forma obtener el hidrógeno por electrólisis del agua. También es posible emplear la energía eléctrica generada por un sistema de concentración solar para llevar a cabo electrólisis a alta temperatura, cuya ventaja es un menor requerimiento de energía eléctrica. La electrólisis es el proceso principal de estos sistemas y consiste, como ya sabemos, en la reacción electroquímica que separa la molécula del agua en hidrógeno y oxígeno, mediante la aplicación de un voltaje o corriente eléctrica generalmente de tipo continua, que promueve las reacciones de óxido-reducción.

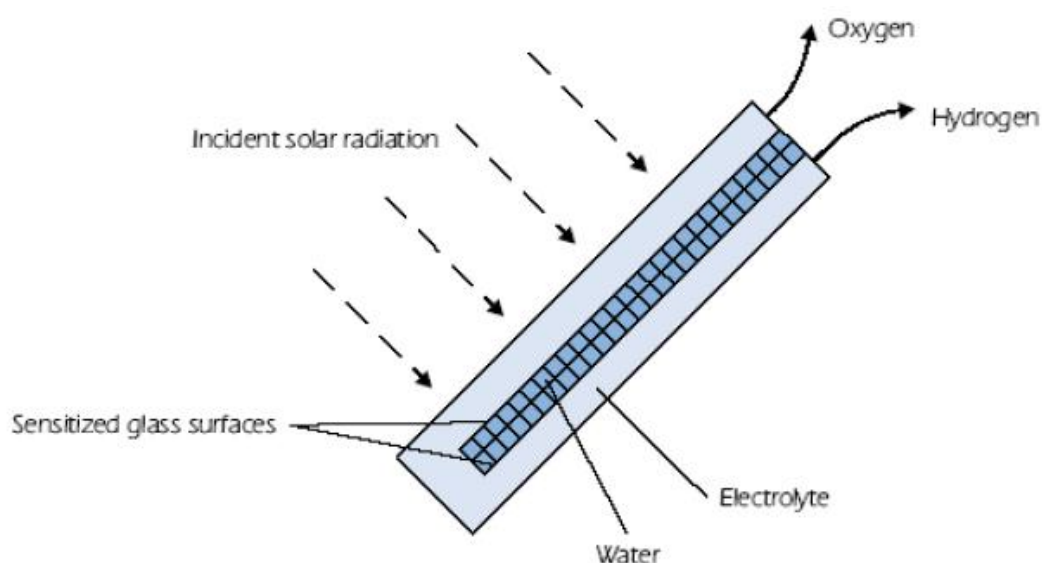
Hay que decir que este es uno de los métodos de producción de hidrógeno más costoso a día de hoy. Con las tecnologías vigentes, el coste de producción de hidrógeno a partir de electrólisis fotovoltaica es 25 veces mayor que el coste de producción de hidrógeno utilizando alternativas que usan combustibles fósiles [1]. Sin embargo, el coste de las células fotovoltaicas se espera que decrezca, por lo que se estima que este valor disminuirá a 6 veces más.

El costo de la producción de hidrógeno mediante electrólisis a partir de energía solar fotovoltaica es elevado dado que la relación entre el volumen de hidrógeno generado por superficie de sistemas fotovoltaicos de escala comercial es baja. Por esta razón se continúa investigando en encontrar materiales para los electrodos que permitan aumentar el rendimiento de la electrólisis, realizándola a mayores temperaturas, como forma de disminuir los costos de producción y que, en consecuencia, el proceso sea más competitivo y atractivo en el mercado.

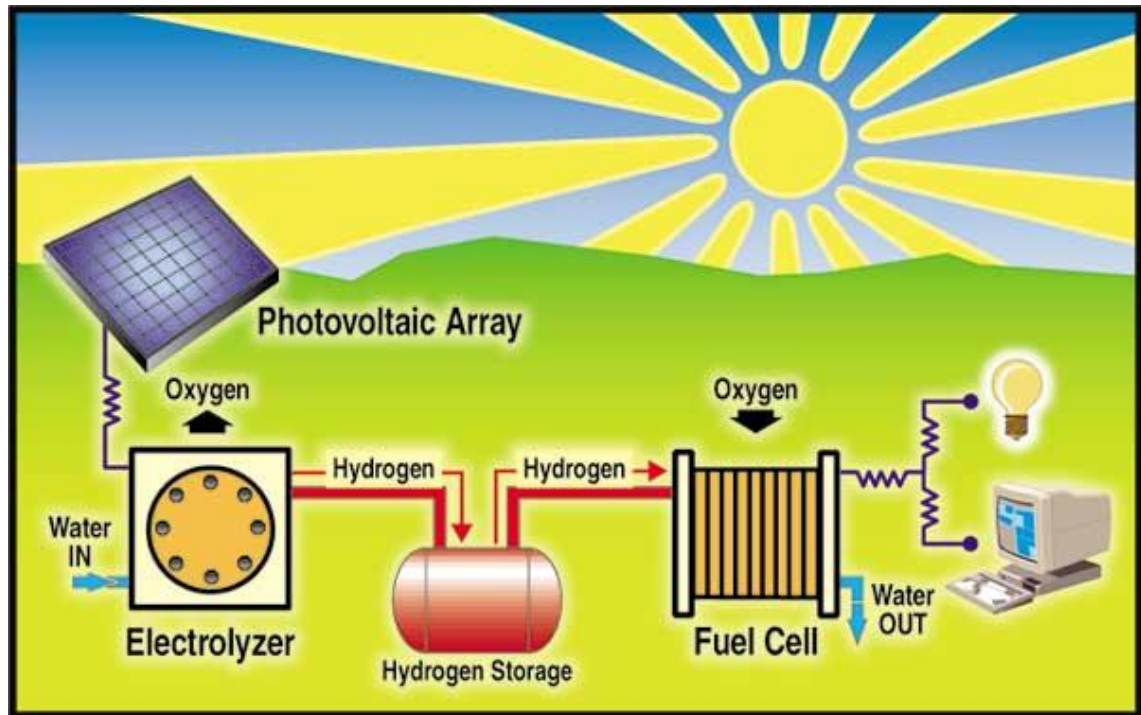
Además, existen varias líneas de investigación para aumentar la rentabilidad de las células fotovoltaicas:

- Utilizar menos material, para reducir el coste de las células.
- Conseguir que sobre una célula llegue más radiación, mediante métodos de concentración de la radiación solar. El problema es que tampoco se puede aumentar mucho la radiación porque la célula se calienta mucho, y al aumentar la temperatura de la célula disminuye el rendimiento.

Por tanto, para avanzar en el progreso de las células foto-electroquímicas es necesario un progreso en la ciencia e ingeniería de los materiales. Es muy importante mejorar los materiales de los fotoelectrodos para mejorar la eficiencia y resistencia a la corrosión.



**Figura 11: Esquema de placa fotovoltaica para producción de hidrógeno. [18]**



*Figura 12: Proceso electroquímico de obtención de hidrógeno a partir de energía solar. [SchatzEnergy Research Center, 2000]*

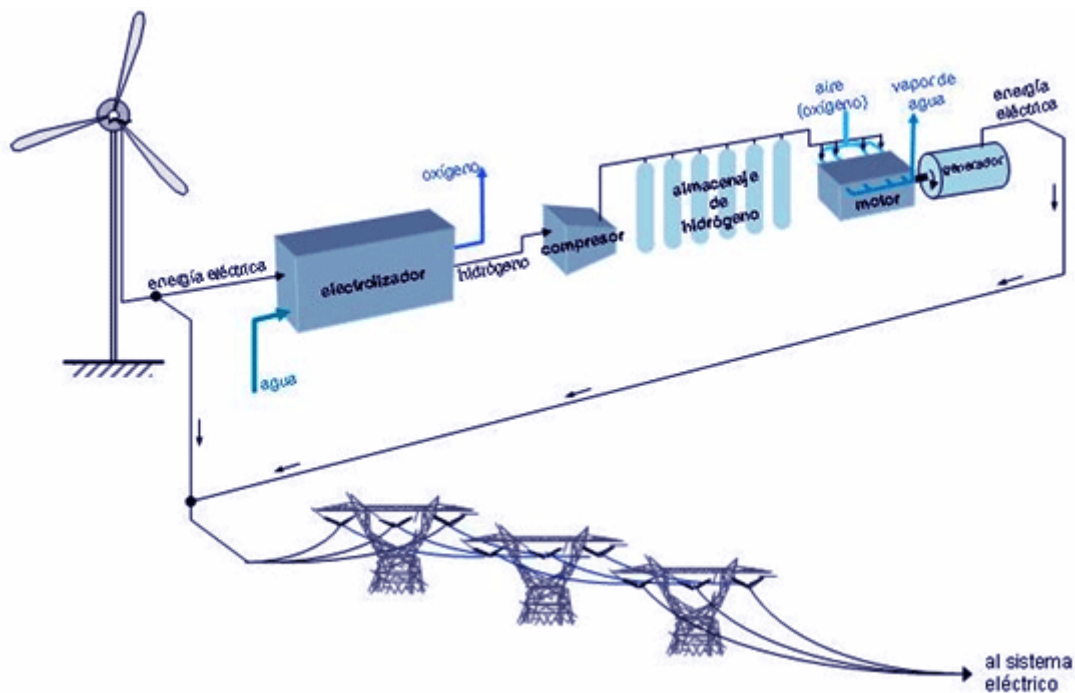
***Producción de hidrógeno a partir de energía eólica:***

El fin de unir la tecnología de la producción de hidrógeno a la energía eólica es que se produzca un acoplamiento entre la producción de energía y su consumo final. Uno de los principales objetivos de la tecnología del hidrógeno es que dicho elemento sirva de sistema de almacenamiento de energía. Para englobar de forma continua la inclusión de producción de hidrógeno en los parques eólicos (para producción a gran escala) o en un aerogenerador (producción aislada) se habla de sistemas integrados eólica-hidrógeno.

Un sistema híbrido de producción de hidrógeno mediante energía eólica está compuesto principalmente por los siguientes elementos:

- Aerogenerador, o conjunto de aerogeneradores formando un parque eólico: es la fuente de energía primaria del sistema. Un aerogenerador convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica.

- Electrolizador: es el equipo en el que se produce hidrógeno a partir de la electrólisis del agua. Como subproducto de la reacción química que tiene lugar en su interior, se obtiene oxígeno, susceptible de ser aprovechado.
- Almacenamiento de hidrógeno: se dispone de un sistema de almacenamiento de hidrógeno, el cual almacenará el hidrógeno producido en el electrolizador.



*Figura 13: Esquema de un sistema integrado eólica-hidrógeno.*

El funcionamiento de estos sistemas de almacenamiento de energía eléctrica es el siguiente:

Cuando la potencia eléctrica producida por un parque eólico es mayor que la demanda de la red, o superior a la predicción de potencia eléctrica realizada, la potencia eléctrica sobrante se destina a un electrolizador en el que se produce la electrólisis del agua (reacción electroquímica en la que se forma hidrógeno y oxígeno). El hidrógeno se almacena, y por lo general, el oxígeno se ventea al ambiente.

Cuando la demanda de potencia de la red eléctrica es superior a la generación, o la predicción de potencia a producir es superior a la que se da en ese instante, el

hidrógeno es consumido para ajustar la producción de potencia eléctrica predicha a la real. Existen diversos modos de realizar la transformación: mediante la combustión del hidrógeno en motores de combustión interna alternativos conectados a generadores eléctricos, o mediante su consumo en pilas de combustible.

Si la producción eléctrica coincide con la demanda de la red, no es necesario un sistema de almacenamiento.

Pese a la madurez de la tecnología eólica y de electrólisis de baja temperatura, no se puede pensar en una producción masiva de hidrógeno a partir de la energía eólica, puesto que el poder calorífico es de  $3\text{kWh/Nm}^3$ , y los electrolizadores alcanzan una eficiencia del 80%, requiriendo por tanto  $3,5\text{kWh/Nm}^3$  de hidrógeno producido. Asumiendo una eficiencia del 50% para una pila de combustible de baja temperatura se tendría una eficiencia global del sistema de:

$$3,5 \frac{\text{kWh aportados al electrolizador}}{\text{Nm}^3\text{H}_2} \frac{1\text{Nm}^3\text{H}_2}{3\text{kWh}} \frac{100\text{kWh consumidos H}_2}{50\text{kWh producidos por pila}} \\ = 2,33 \frac{\text{kWh aportados}}{1\text{kWh producidos}}$$

Esto supone que se recupera aproximadamente un 43% de la energía eléctrica generada por energía eólica. Si bien este resultado claramente no resulta adecuado para la producción masiva de hidrógeno, resulta también dudoso como técnica de acumulación por bombeo de los parques eólicos, es decir, almacenar en forma de hidrógeno la energía producida en horas valles para vender más tarde la electricidad generada por la pila de combustible. Bien es verdad que esta técnica juega con las diferentes tarifas de horas valle y punta, el resultado anterior indica que no se puede recuperar más de un 43% de la energía producida inicialmente, lo que lleva a que el ratio de tarifas ha de ser mayor de 2,33 a 1 para que el proceso global sea rentable. En este sentido, parece más razonable utilizar la energía producida por el aerogenerador en una central de bombeo hidráulico, que presenta mejores eficiencias de conversión. [El hidrógeno y la energía. Colección: Avances de Ingeniería, J. Linares, Beatriz Y. Moratilla].

No obstante, si la tecnología de electrolizadores y pilas consigue reducir costes de manera que en inversiones el sistema de hidrógeno fuere competitivo con el hidráulico, el primero podría ser más interesante al ser mucho más compacto y requerir menos mantenimiento, una vez que la vida de electrolizadores y pilas se hubiese mejorado.

Es por esto que la utilización de la energía generada por las turbinas eólicas para llevar a cabo la electrólisis del agua se muestra como la opción más potencial para producir hidrógeno sin contaminación, especialmente en sistemas distribuidos. Uno de los desafíos de esta tecnología es disminuir el coste de las turbinas de viento y de los electrolizadores. Otro reto importante es la optimización del sistema integrado turbina-electrolizador-sistema de almacenamiento.

Actualmente, el coste de producir hidrógeno usando turbinas de viento está en torno a 6-10 veces mayor que el coste de producirlo usando alternativas con combustibles fósiles, aunque se espera que este intervalo se reduzca a la mitad en el futuro. [1]

Esta tecnología de almacenamiento presenta la ventaja con respecto a otras de que el hidrógeno no sólo puede ser empleado para la producción de energía eléctrica, sino que también se puede destinar a otras aplicaciones, como el transporte o la industria.

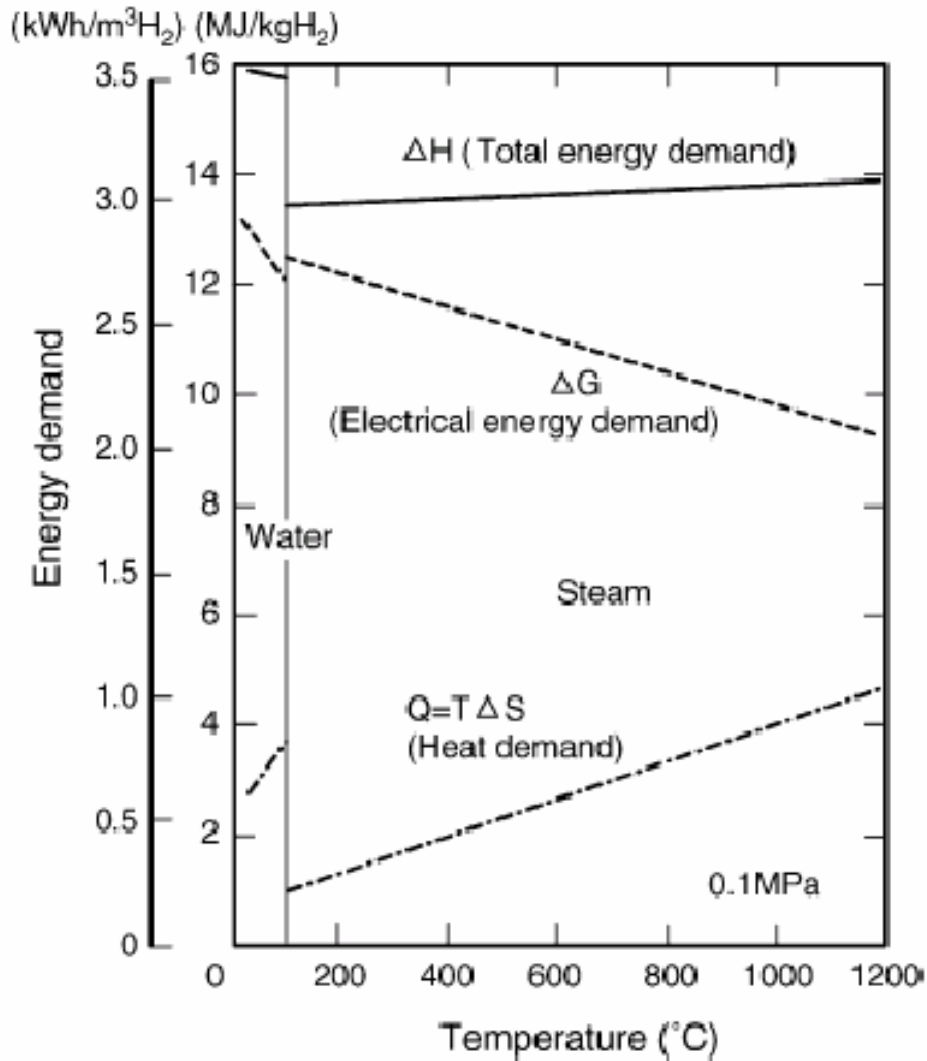
#### *Electrólisis a alta temperatura.*

---

La electrólisis a alta temperatura está basada en la tecnología de combustible a altas temperaturas. La electricidad requerida para romper el agua a 1000°C es menor que la necesaria para electrólisis a 100°C. Esto significa que los electrolizadores a altas temperaturas pueden operar a una mayor eficiencia que los electrolizadores ordinarios. A estas temperaturas las reacciones de electrodo son más reversibles y la reacción de la celda de combustible se revierte más fácilmente a la reacción de electrólisis.

El consumo de electricidad, siendo alto, comienza a resultar aceptable. Para esta operación se precisa disponer de agua y de una fuente térmica de elevada

temperatura, que puede ser energía solar concentrada o energía nuclear de reactores avanzados. Los electrolizadores también han de ser modificados, pasando a ser de óxidos sólidos.



**Figura 14: Demanda de energía para la electrólisis del agua y del vapor. [22]**

La curva superior representa el cambio de entalpía ( $\Delta H$ ) y la curva inferior corresponde a la variación de la energía de Gibbs ( $\Delta G$ ), cuya ecuación es:

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

Donde  $\Delta S$  corresponde al cambio de entropía,  $T \Delta S$  representa el requerimiento del proceso y  $\Delta G$  es la demanda eléctrica. La energía total que se requiere ( $\Delta H$ ) para la

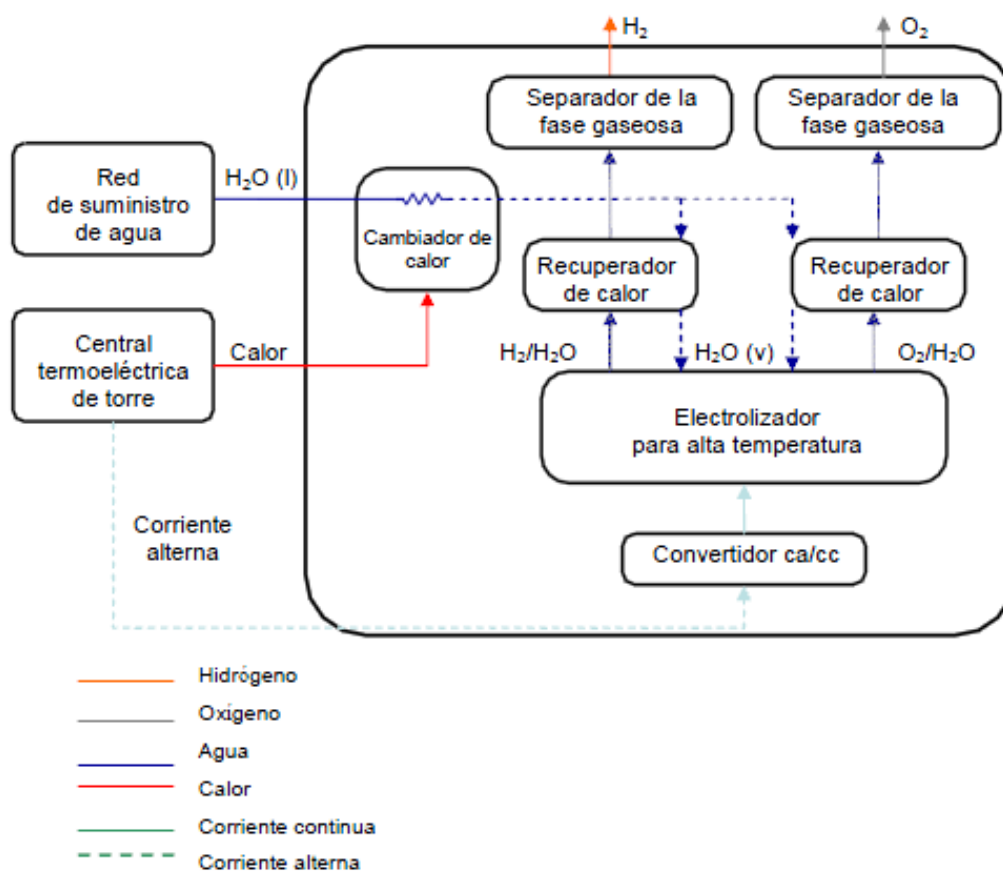
disociación, bien sea de agua o de vapor, es la suma de la energía libre de Gibbs ( $\Delta G$ ) y de una cierta cantidad de energía calorífica ( $T \Delta S$ ). La demanda de energía eléctrica ( $\Delta G$ ) disminuye conforme aumenta la temperatura. Es por ello que la electrólisis del vapor puede producir hidrógeno con una potencia eléctrica menor que la que se requiere para el caso del agua a temperaturas inferiores.

Se demuestra con esta figura que la demanda eléctrica disminuye con el aumento de la temperatura a la que tiene lugar el proceso. Por lo tanto, la electrólisis de alta temperatura utiliza una cantidad de energía eléctrica menor que la electrólisis en condiciones normales de temperatura.

Aunque la eficiencia de conversión del agua en oxígeno e hidrógeno puede llegar a ser del 80% bajo presión, en general, la eficiencia de la obtención de hidrógeno a partir de electrólisis es mucho menor porque está limitada por la eficiencia de la planta de energía nuclear, la cual ronda el 33% con los actuales reactores nucleares empleados.

Desarrollar reactores que operen a temperaturas de salida más alta es una posible forma de solucionar el problema de la baja eficiencia. Un dato significativo es que a 350°C se obtiene una eficiencia del 20%, que se incrementa hasta el 50% si la temperatura de operación es de 950°C.





**Figura 15: Esquema del proceso de electrólisis a alta temperatura. [19]**

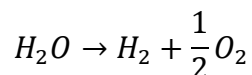
En la figura se expone un diseño conceptual de electrólisis de alta temperatura acoplada a una fuente de alta temperatura en el que la fuente de calor del proceso puede ser energía nuclear o energía solar de concentración.

### 3.2.2.2. Procesos termoquímicos.

#### Termólisis.

Los procesos de termólisis implican la extracción del hidrógeno de la molécula que lo alberga (hidrocarburo o agua) mediante la aplicación de calor. Bajo esta definición, el reformado, la gasificación y la pirolisis se pueden entender como procesos de termólisis. La consideración de estos procesos como métodos químicos o termolíticos depende de la fuente de calor empleada. Así, se habla de procesos químicos cuando el calor para el proceso se extrae de la propia materia prima a través de una combustión; y por el contrario, se habla de procesos de termólisis cuando el calor procede de una

fuerza externa, como la energía solar concentrada o la energía nuclear de alta temperatura. Aquí nos centramos en la termólisis del agua, que es una reacción de disociación que ocurre en un único paso:



Aunque esta reacción es aparentemente muy sencilla, presenta dos graves inconvenientes que dificultan su desarrollo. Por un lado, las elevadas temperaturas que se precisan para conseguir un grado de disociación razonable (superiores a 2500K), dan lugar a problemas de materiales. Por otro lado, la necesidad de una técnica efectiva de separación del hidrógeno y el oxígeno, para evitar una mezcla explosiva. Estos dos inconvenientes son la causa de que no exista de momento ninguna planta piloto en la que se realice la descomposición directa del agua.

Los principales tipos de procesos termolíticos se pueden agrupar en función de la temperatura de operación, siendo el proceso que mayor temperatura requiere la termólisis directa del agua.

#### *Ciclos termoquímicos.*

---

La termólisis directa del agua implica trabajar con temperaturas muy elevadas, aproximadamente 4000°C, y no es aplicable en condiciones normales de presión. Para evitar trabajar con esas temperaturas, se utilizan los llamados ‘ciclos termoquímicos’, con los cuales se puede producir la ruptura de la molécula de agua a temperaturas menores.

Los ciclos termoquímicos consisten en la descomposición del agua para obtener hidrógeno y oxígeno, mediante una serie de reacciones químicas endotérmicas y exotérmicas que constituyen ciclos compuestos de varias etapas. La mayor ventaja de este método es que el hidrógeno y el oxígeno se obtienen por separado y no requiere temperaturas tan altas como en el caso de la termólisis directa. Sin embargo, la existencia de varias etapas en estos ciclos reduce el rendimiento global del proceso debido a la irreversibilidad asociada a cada una de las mismas.

En la actualidad, se están adelantando diversas investigaciones con el fin de establecer ciclos termoquímicos que empleen menos etapas y, en consecuencia, sean más eficientes para ser implementados a gran escala porque los ciclos pueden consistir incluso de ocho reacciones que involucran hasta cinco elementos diferentes al hidrógeno y el oxígeno. Los ciclos que emplean catalizadores basados en óxidos y en óxidos mixtos de diferentes metales de transición, al tener menor número de etapas, requerir temperaturas menos elevadas, una mayor eficiencia global del ciclo y permitir la recuperación del catalizador de forma más sencilla; han sido los que mayor proyección han logrado, al punto que algunos de ellos han sido probados a escala de planta piloto, dentro de los que se destacan los óxidos de Zinc, de hierro, de manganeso y algunas ferritas.

Existen alrededor de trescientos ciclos propuestos, de manera que para la selección de uno de ellos se tiene en cuenta los siguientes criterios:

- Número de reacciones y/o pasos de separación en el ciclo.
- Número de elementos que intervienen.
- Costo y disponibilidad de los procesos químicos.
- Corrosividad de las especies involucradas.
- Costo y disponibilidad de los materiales de construcción.
- Condiciones ambientales, de seguridad y salud.
- Efecto de las elevadas temperaturas proyectadas en los costos
- Cantidad de investigaciones realizadas sobre el ciclo.
- Existencia de algún modelo operando en forma continua.

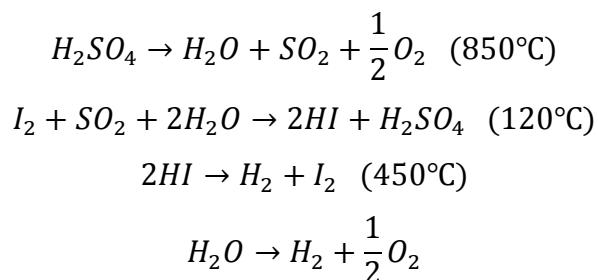
En ocasiones se enumeran algunos criterios que son importantes a la hora de selección de un ciclo para su implementación: eficiencia térmica, temperatura de operación (cuanto más baja mejor), el  $\Delta G$  de las reacciones individuales debe ser negativo o próximo a cero (para disminuir los requerimientos de energía), la velocidad de reacción de cada paso individual debe ser elevada y similar a la de los otros pasos, la separación de los productos de reacción debe ser mínima en términos de consumo de energía y costo y los productos intermedios deben ser fácilmente manejables.

Se ha demostrado que los ciclos termoquímicos de hidrólisis (TCWCs, thermochemical water splitting cycles) tienen un potencial de eficiencias de liberación global del sistema de un 40% [Analysis of Solar Thermochemical Water-Splitting Cycles for Hydrogen Production, University of Central Florida.]. Entre los TCWCs más estudiados están los ciclos de halógenos de azufre y los del tipo UT-3, que se consideran ciclos termoquímicos de temperatura moderada.

En la actualidad hay dos fuentes de alta temperatura potencialmente disponibles para ser utilizadas en este proceso termoquímico. Y estas son un concentrador solar térmico con un sistema de receptor central, y los reactores nucleares.

#### ***Ciclo termoquímico S-I.***

El ciclo de Azufre-Yodo fue desarrollado en General Atomics, INC. y se describió por primera vez a mediados de los setenta. Es un ciclo termoquímico de hidrólisis del agua. Consiste en tres reacciones químicas, que juntas suman la disociación del agua.



***Figura 16: Reacciones del ciclo termoquímico Azufre-Yodo. [9]***

Las temperaturas que aparecen entre paréntesis son las temperaturas mínimas necesarias para que se produzca la reacción. Las reacciones primera y tercera son endotérmicas, mientras que la segunda es exotérmica.

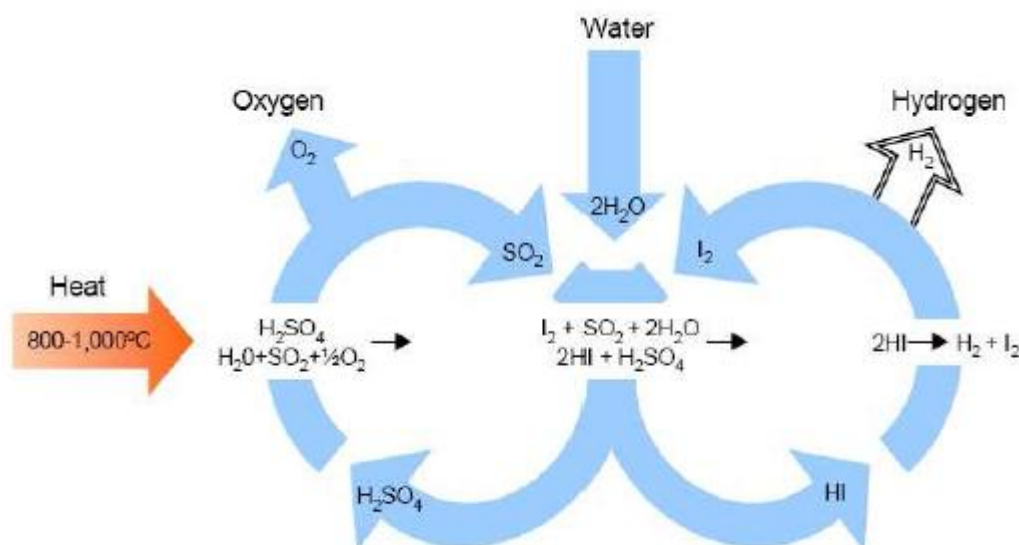


Figura 17: Ciclo termoquímico Azufre-Yodo. [9]

El único reactante que necesitaría ser añadido en el ciclo es el agua, y todos los reactantes son regenerados y reciclados. En el ciclo azufre-yodo, la mayoría del calor suministrado va a la disociación del ácido sulfúrico.

La eficiencia del ciclo azufre-yodo no es simple de estimar porque el proceso es completo. Para calcularla hay que tener en cuenta las entalpías y la energía libre de Gibbs de las reacciones, que se detallan en la tabla siguiente.

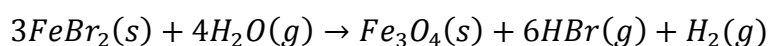
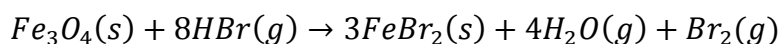
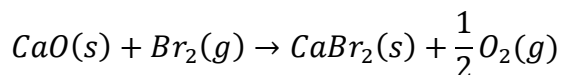
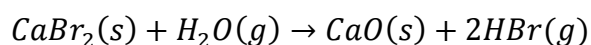
Reacción	$\Delta H$ (kJ/mol)	$\Delta G$ (kJ/mol)
$I_2 + SO_2 + 2H_2O \rightarrow 2HI + H_2SO_4$	-52.626	-10.737
$H_2SO_4 \rightarrow H_2O + SO_2 + \frac{1}{2}O_2$	44.348	-16.412
$2HI \rightarrow H_2 + I_2$	-4.210	10.818

La tabla anterior podría sugerir que hay energía liberada por el proceso, y que la energía suministrada es despreciable, sin embargo, no es así. Es necesario suministrar una gran cantidad de energía en la separación de los procesos. Además, las etapas del ciclo transcurren en distintos estados de fase, la mayoría líquidos. Una eficiencia térmica realista de la producción de hidrógeno sería del 50%.

La mayor ventaja del ciclo de azufre es que como productos se libera  $H_2$  y  $O_2$  únicamente. Si se aporta el calor por una fuente renovable, podría ser una solución medioambiental ideal para la producción de hidrógeno. Sin embargo, los constituyentes del ciclo son los dos muy corrosivos, las soluciones de ácido sulfúrico y el ácido yódico son muy dañinas y deben ser dispuestas en contenedores adecuados. Además, el control de las condiciones de la reacción también es una dificultad importante. Así, una variación de este ciclo es el llamado ciclo Bowman-Westinghouse que emplea bromo el lugar de yodo y la electrólisis del ácido brómico en lugar de la descomposición térmica del HI.

### ***Ciclo termoquímico UT-3.***

Este es un ciclo desarrollado en la Universidad de Tokyo, y se trata de uno de los ciclos más estudiados a nivel mundial. La eficiencia del ciclo se encuentra en el rango entre el 40-50%, e involucra las siguientes cuatro reacciones sólido-gas:



***Figura 18: Reacciones del ciclo termoquímico UT-3. [9]***

La primera reacción es la etapa cinéticamente más lenta de las cuatro reacciones, y por lo tanto la que limita la velocidad de todo el ciclo. Debido a que todas las reacciones deben transcurrir a la misma velocidad, para una operación continua del ciclo, la baja tasa de la hidrólisis del bromuro de calcio afecta desfavorablemente al proceso. Otra indeseable característica del ciclo UT-3 es que es un proceso tipo gas-sólido consistiendo en un par de reacciones de hidrólisis (endotérmicas) y una reducción del bromo (exotérmica) que transcurre en cuatro reactores en serie. Para conducir este proceso en un lecho de reactores unido, los gases tendrían que fluir alternativamente en direcciones opuestas. Es decir, un reactor tiene que realizar una reacción

endotérmica en una dirección durante unas dos horas y después una exotérmica en dirección contraria durante las siguientes dos horas, y así sucesivamente. Por otra parte, la separación del hidrógeno de los productos se realiza mediante membranas que operan por debajo de la operación atmosférica, por lo que es necesario comprimir el H<sub>2</sub> y el O<sub>2</sub>, con el consiguiente consumo energético.

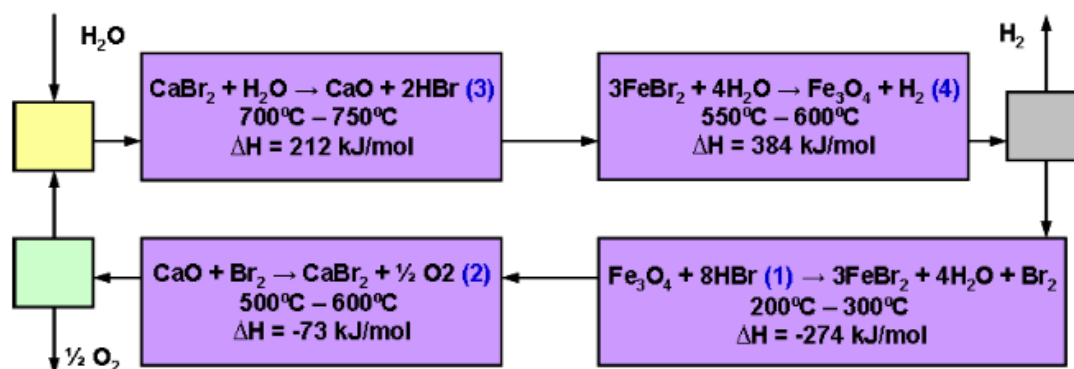


Figura 19: Esquema del ciclo termoquímico UT-3. [17]

### 3.2.2.3. Procesos fotoquímicos.

Otro proceso extraordinariamente atractivo de producción de hidrógeno es la disociación del agua sobre semiconductores utilizando luz solar. La eficiencia de este proceso viene determinada principalmente por las propiedades foto-físicas y la morfología del material semiconductor empleado. Conforme al estado de esta tecnología, la aplicación comercial de la producción de hidrógeno mediante energía fotónica del espectro visible requiere desarrollos importantes en la ciencia e ingeniería hasta conseguir fotocatalizadores activos y estables en la reacción de disociación. Cuestiones como la transferencia de carga entre el semiconductor y el co-catalizador y su dependencia de factores estructurales y electrónicos de la interfase permanecen abiertas. Estas áreas representan oportunidades excelentes de mejora de los fotocatalizadores utilizados en disociación fotoquímica del agua. El control de la morfología del catalizador en la escala nanométrica mediante procesos de fabricación innovadores es otra de las direcciones que permitirá modular la morfología y la reactividad de los fotocatalizadores.

Actualmente se conocen dos procedimientos fotoquímicos: los fotoelectroquímico y los fotobiológicos. Tal y como ya se ha dicho, en ambos casos se trata de procedimientos actualmente en investigación y que se plantean a largo plazo.

#### *Procesos fotobiológicos.*

---

Las cianobacterias y las algas verdes pueden producir hidrógeno utilizando únicamente luz solar, agua y una enzima denominada hidrogenasa. Bajo condiciones anaeróbicas, estos microorganismos utilizan la fotosíntesis para generar reductores de alta energía, electrones, necesarios para que la hidrogenasa reduzca catalíticamente los protones a  $H_2$ . Los electrones y protones vienen del agua, el oxígeno es generado a partir de la fotosíntesis y puede inactivar a la hidrogenasa. Al inactivar a la enzima esta deja de producir hidrógeno. El Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) está explorando dos caminos para resolver este problema de sensibilidad al  $O_2$ . El primero utiliza un proceso con azufre para regular la fotosíntesis. Este proceso crea las condiciones anaeróbicas requeridas para la fotoproducción de hidrógeno. El segundo involucra modificar con ingeniería genética a la hidrogenasa para eliminar su sensibilidad al oxígeno.

La eficiencia potencial de conversión de luz en este proceso es del 10%, y análisis económicos radican que una vez que las limitaciones inherentes hayan sido propiamente resueltas mediante el avance de las investigaciones, la producción fotobiológica del  $H_2$  podría convertirse en una tecnología apreciable comercialmente.

Los científicos de NREL están trabajando con el alga verde *Chlamydomonas reinhardtii*. Y estos tienen como objetivo desarrollar un proceso de biofotólisis que dé como resultado un sistema comercial de producción de  $H_2$ , que sea rentable económicamente, escalable a una producción masiva, no contaminante, y que se sustente por sí mismo.

La eficiencia solar de conversión de las algas verdes es del 10% y la de las bacterias fotosintéticas del 6%.

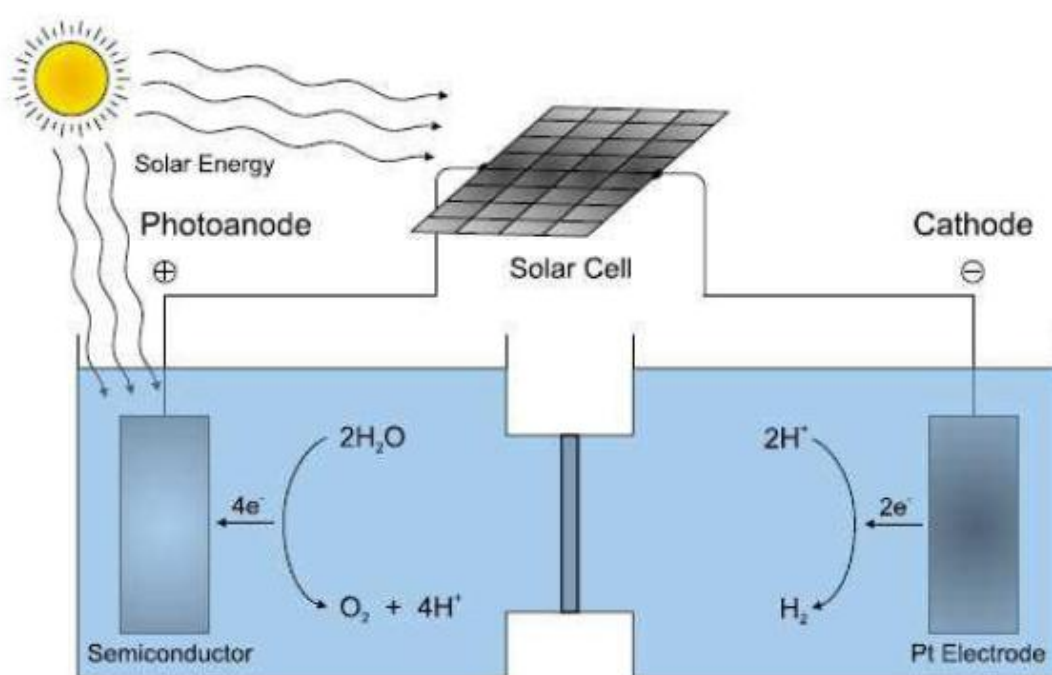


### *Procesos fotoelectroquímicos.*

El sistema fotoelectroquímico consiste en el proceso de electrólisis cuando la electricidad necesaria para llevar a cabo el proceso se genera a partir de energía solar, en este caso mediante paneles fotovoltaicos. Además uno de los electrodos de material semiconductor es iluminado de forma que la interfaz entre el electrodo y el electrolito forman el fotoelectrodo. Los materiales más utilizados para el fotoánodo son:  $\text{WO}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ , n- $\text{GaAs}$ ,  $\text{CdS}$  y  $\text{ZnS}$ .

Diferentes materiales semiconductores trabajan en diferentes longitudes de onda, de manera que las investigaciones se centran en seleccionar aquellos que disocien el agua y sean estables en ella.

El atractivo de este procedimiento radica en que ofrece gran potencial de reducción de costes, presenta una eficiencia un 30% mayor que la electrólisis realizada con células fotovoltaicas.



*Figura 20: Sistema fotoelectroquímico. [24]*

### 3.2.3. Obtención a partir de biomasa.

La biomasa se define como la materia orgánica que está disponible en una base renovable a partir de un proceso natural o como subproducto de un proceso que utiliza fuentes renovables. Los desechos del procesamiento de la madera y de la agricultura, así como los residuos sólidos urbanos y de animales pueden ser usados como biomasa para la producción de hidrógeno. La mayoría de la biomasa se usa en procesos de combustión en fábricas que producen electricidad como generación de producto de uso final. Actualmente, los procesos de gasificación de la biomasa para producción de hidrógeno no son viables para producción a gran escala y a un precio competitivo. Sin embargo, con este método, los residuos domésticos y de la agricultura pueden ser recuperados de una manera limpia.

En el proceso de conversión de biomasa, el hidrógeno se produce de manera similar que a partir de carbón por gasificación. No existen plantas comerciales que produzcan hidrógeno a partir de biomasa.

La gasificación y la pirolisis están consideradas como las tecnologías más prometedoras para la comercialización de la producción de hidrógeno a partir de biomasa a medio plazo.

Las reservas de biomasa son productos no refinados con una calidad inconsistente y con un pobre control de calidad. Los métodos de producción varían según el tipo, localización o variaciones climáticas. Los combustibles inadecuados han contribuido a las dificultades en el desarrollo tecnológico, como tener poca homogeneidad y baja calidad, ya que se necesita un sistema de conversión más sofisticado. Hay por tanto una necesidad de preparar el combustible para que tenga una mayor calidad y consistencia. Los sistemas a gran escala pueden utilizar combustibles más baratos y de peor calidad, mientras que los sistemas más pequeños necesitan un mejor combustible.

La producción de hidrógeno a partir de la biomasa ofrece la ventaja de proporcionar un portador renovable de energía con una importante reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

La biomasa puede ser convertida en hidrógeno a partir de distintos métodos:

#### ***3.2.3.1. Gasificación de la biomasa.***

La gasificación de la biomasa es un área que se encuentra entre la producción de hidrógeno y la obtención de biocombustibles. En este proceso la biomasa se calienta a alta temperatura, llevándose a cabo una combustión incompleta entre 700 y 1200°C, en un reactor donde se rompen las uniones de las moléculas que forman la biomasa. Esto genera un gas constituido principalmente por hidrógeno, monóxido de carbono y metano. Este metano se transforma en hidrógeno y dióxido de carbono a partir del mismo método de reformado de vapor.

La gasificación de la biomasa presenta una serie de ventajas frente a otros métodos de producción de hidrógeno, como son que las emisiones de dióxido de carbono procedentes de la gasificación de la biomasa no contribuyen al incremento neto de las emisiones de gases de efecto invernadero. Por otro lado, la gasificación de la biomasa es actualmente uno de los métodos más avanzados de producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables. Además, una gran variedad de residuos agrícolas y otras fuentes de biomasa pueden ser utilizadas para producir hidrógeno, y este hecho, permite que este método pueda ser empleado cerca del punto de uso, reduciendo así los costes.

#### ***3.2.3.2. Pirólisis de la biomasa.***

Consiste en la combustión incompleta de la biomasa en ausencia de oxígeno, a unos 500°C. Se obtiene carbón vegetal y gas mezcla de monóxido y dióxido de carbono, hidrógeno e hidrocarburos ligeros.

La pirolisis de la biomasa para la producción de hidrógeno tiene el potencial de ser competitivo económicamente con los actuales procesos comerciales para la producción de hidrógeno. El concepto tiene algunas ventajas frente a la tecnología tradicional de gasificación. El bioaceite, producido por la pirolisis de la biomasa, se transporta fácilmente de modo que la segunda etapa de reformado de vapor se puede realizar en diferentes localizaciones, cerca de donde se vaya a utilizar o distribuir el hidrógeno. La segunda ventaja es el potencial para la producción y recuperación de un subproducto valioso del bioaceite que puede impactar significativamente en la

economía del proceso completo. Por lo tanto, una estrategia para incentivar este tipo de producción de hidrógeno, sería el conseguir un subproducto valioso, como podría ser el carbón activo, o los adhesivos.

#### ***3.2.3.3. Oxidación parcial de la biomasa con agua en estado supercrítico.***

Este tipo de proceso implica la producción de hidrógeno a partir de los combustibles de 'bajo grado' como son las basuras municipales, la biomasa y el carbón con alto contenido en azufre. La oxidación parcial del agua en estado supercrítico (SWPO, supercritical water partial oxidation) implica llevar a cabo reacciones oxidativas en un ambiente de agua en condiciones supercríticas, es decir, vapor a alta presión, en presencia de cantidades limitadas de oxidante, generalmente oxígeno puro o aire.

La oxidación parcial in situ calienta rápidamente el medio de gasificación, dando lugar a menos carbonización y una mejora en la producción de hidrógeno. Las altas presiones, un ambiente acuoso de alta densidad es ideal para la reacción y la gasificación orgánica. El alto contenido en agua del medio favorece la formación de hidrógeno y de productos ricos en hidrógeno y es compatible con pasos con alto contenido en agua como son los fangos y la biomasa, y elimina la necesidad del proceso de secado de los pastos. El alto contenido en agua del ambiente también es efectivo para la gasificación de materiales pobres en hidrógeno como es el carbón. Actualmente este proceso se encuentra en investigación y desarrollo.

#### ***3.2.3.4. Fermentación.***

La compañía Wageningen UR ha desarrollado un proceso para la producción de hidrógeno que consiste en dos fermentaciones consecutivas. Los méritos específicos del bioproceso son la producción de hidrógeno a pequeña escala a partir de biomasa húmeda.

La primera fermentación la realiza una bacteria termofílica a una temperatura de 70°C. Las concentraciones típicas de los gases de escape se encuentran entre el 50% en la primera fermentación y superior al 85% en la segunda. Estos gases de escape pueden alimentar directamente una célula de combustible tipo PEM.

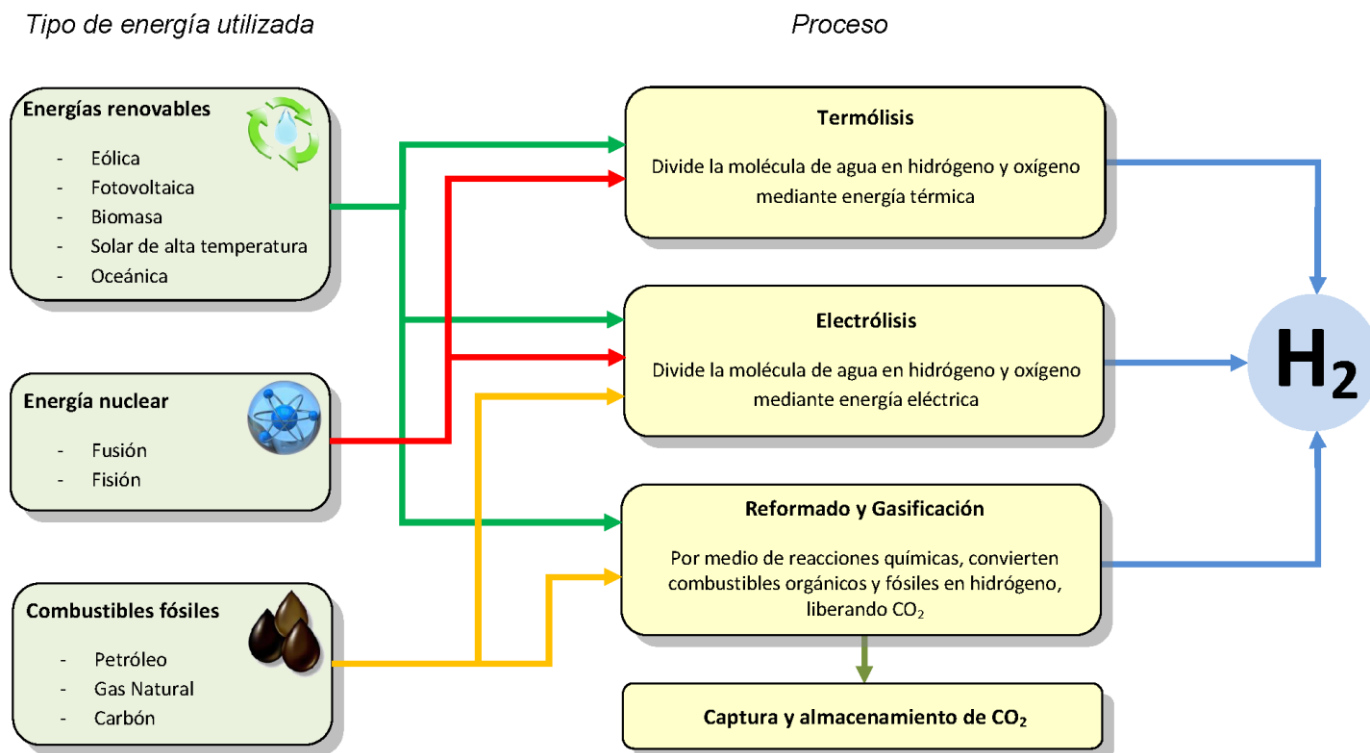
La bacteria termofílica produce hidrógeno libremente en la glucosa, xilosa, oligosacáridos y almidón. La celulosa puede ser fermentada en hidrógeno con una tasa

de conversión baja. Para emplear biomasa lignocelulósica son necesarios pretratamientos e hidrólisis. Durante la fermentación de una bacteria termofílica, como por ejemplo la *Caldicellulosiruptor saccharolyphilic*, se producen como subproductos ácido acético y en mucha menor medida ácido láctico. Los dos ácidos están listos para ser convertidos en hidrógeno y CO<sub>2</sub> por una bacteria fotoheterotrófica como puede ser la *Rhodobacter capsulatus*, a temperatura ambiente y en presencia de luz.

La compañía Wageningen UR ha desarrollado un diseño conceptual para una planta de producción de H<sub>2</sub> a partir del vapor de pieles de patatas.

Por otro lado, el grupo de Biotecnología de la Universidad Estatal de Iowa ha desarrollado un nuevo proceso de fermentación que convierte las corrientes de residuos orgánicos en gas rico en hidrógeno. El proceso emplea mezclas de cultivos microbiológicos disponibles en la naturaleza, como son el compostaje, los fangos digestivos anaeróbicos y el suelo, para convertir los residuos orgánicos en gas rico en hidrógeno. Se obtuvo con tratamientos de calor, control del pH y control de la retención hidráulica temporal en el sistema de tratamiento, un cultivo enriquecido en una bacteria productora de hidrógeno, la *Clostridia*.

### 3.3. Esquema resumen de procesos de producción de hidrógeno.



*Figura 21: Esquema-resumen de procesos de producción de hidrógeno. [Centro Nacional del Hidrógeno CNH, 2014]*

Existe una cantidad enorme de investigaciones llevadas a cabo con el propósito de desarrollar los diferentes métodos de generación de hidrógeno. Actualmente, la tecnología más desarrollada, y a la vez más utilizada, es el reformado de hidrocarburos fósiles. Sin embargo, con el objetivo de disminuir la dependencia a los combustibles fósiles, se están realizando importantes avances en los métodos de producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables, como el agua o la biomasa.

TECNOLOGÍA	MATERIA PRIMA	EFICIENCIA	MADUREZ
Gasificación de la biomasa	Biomasa	35-50	Comercial
Fotólisis	Agua y luz solar	0.5	Largo plazo
Fermentación de la biomasa	Biomasa	60-80	Largo plazo
Fotofermentación	Biomasa y luz solar	0.1	Largo plazo
Electrolizadores alcalinos	Agua y electricidad	50-60	Comercial
Electrolizadores PEM	Agua y electricidad	55-70	Corto plazo
Electrólisis a alta temperatura	Agua, electricidad y calor	40-60	Medio plazo
Ciclos termoquímicos	Agua y calor	-	Largo plazo
Fotoelectroquímica	Agua y luz solar	12.4	Largo plazo

*Figura 22: Eficiencia y madurez de distintas tecnologías para la producción de hidrógeno. [10]*

En la tabla anterior podemos ver un resumen de alguno de los procesos empleados para obtener hidrógeno, junto con las materias primas empleadas para ello y sus eficiencias.

El proceso de obtención de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua con aporte de energía de fuentes renovables es la tecnología de bajas emisiones que se empleará a corto plazo. A largo plazo se prevé emplear biohidrógeno, así como el desarrollo de las tecnologías de los ciclos termoquímicos y la fotoelectrólisis. A pesar de que se han llevado a cabo progresos importantes en el desarrollo de estas tecnologías de producción de hidrógeno, se necesitan más avances técnicos así como la reducción de costes, para poder competir con la producción de hidrógeno a gran escala a partir de las tecnologías de reformado.

Sin embargo, para producción distribuida a pequeña escala existen algunas tecnologías con un coste competitivo, en especial aquellas en las que se utiliza la electrólisis del agua como mecanismo para la obtención del hidrógeno.

Además, es importante recalcar que el hidrógeno puede ser producido a partir de una gran cantidad de materias primas diferentes disponibles casi en cualquier lugar del mundo. A día de hoy existen una gran cantidad de procesos con un mínimo impacto ambiental que se encuentran bajo investigación y desarrollo. Con esto, se pretende

minimizar la dependencia hacia los combustibles fósiles, los cuales principalmente provienen de regiones conflictivas e inestables.

Finalmente, un hecho que en ocasiones puede pasarse por alto es que producir y consumir el hidrógeno por el propio país evita la exportación de una gran cantidad de dinero y trabajo, por lo que el hidrógeno producido 'en casa' aumentará la seguridad energética y económica a nivel nacional. La habilidad del hidrógeno para ser producido por una amplia gama de materias primas y utilizando una amplia variedad de procesos hace que en todas las regiones del mundo, cada país pueda producir la mayoría de su energía necesaria. Queda con esto claro que una vez que las tecnologías asociadas a la producción de hidrógeno se hayan desarrollado y madurado, este será el combustible más disponible.



## 4. Comparación de impacto ambiental.

---

En 2001, el Centro de Ciencia Medioambiental de la Universidad de Leiden publicó la 'Operational Guide to the ISO Standards' para describir los procedimientos del LCA (life-cycle assessment) conforme a los estándares ISO. Así, las categorías de impacto ambiental se seleccionarán basándose en esta guía funcional.

En este estudio, se analizarán los potenciales de **calentamiento global** (GWP, siglas en inglés) y de **lluvia ácida o acidificación** (AP, siglas en inglés) para evaluar el impacto medioambiental de los distintos métodos de producción de hidrógeno.

*El calentamiento global es una medida de las emisiones de CO<sub>2</sub> y la lluvia ácida indica la cantidad del SO<sub>2</sub> descargado en el suelo y en el agua, además de ser una medida del cambio en el grado de acidez.*

La valoración comparativa del calentamiento global y la lluvia ácida que vamos a realizar está basada en la evaluación del ciclo de vida llevada a cabo por Ozbilen (A comparative life cycle analysis of hydrogen production via thermochemical water splitting using a Cu-Cl cycle, Int, Journal of Hydrogen Energy, 2011).

*Un análisis de ciclo de vida (ACV) (Life Cycle Assessment, LCA en inglés), también conocido como análisis de la cuna a la tumba, balance ambiental o evaluación del ciclo de vida (ECV), es una herramienta de diseño que investiga y evalúa los impactos ambientales de un producto o servicio durante todas las etapas de su existencia: extracción, producción, distribución, uso y fin de vida (reutilización, reciclaje, valorización y eliminación/disposición de los residuos/desecho.)*

El ACV es por tanto una metodología empleada en el estudio del ciclo de vida de un producto y de su proceso de producción, con el fin de evaluar el impacto potencial sobre el ambiente de un *producto, proceso o actividad* a lo largo de todo su ciclo de vida mediante la cuantificación del uso de recursos ("entradas" como energía, materias

primas, agua) y emisiones ambientales ("salidas" al aire, agua y suelo) asociados con el sistema que se está evaluando. Con el auge del ecodiseño, este enfoque ha ido integrando con más frecuencia diferentes criterios y parámetros de evaluación del impacto ambiental.

Conforme a las normas internacionales ISO 14040 e 14044, un ACV se realiza en 4 fases que generalmente están interrelacionadas.

### **Definición del objetivo y el alcance**

El ACV comienza con la declaración del objetivo y el alcance del estudio, que incluye el modo en que los resultados se pretenden comunicar. El objetivo y el alcance deben ser coherentes con la aplicación prevista del ACV e incluye información técnica, como por ejemplo la unidad funcional, para su uso como unidad de referencia. Es necesario definir también otros elementos como los límites del sistema y las hipótesis empleadas.

### **Inventario del ciclo de vida**

En el análisis del inventario del ciclo de vida (ICV) se recopilan y cuantifican las entradas y salidas (flujos) y los resultados de un sistema del producto durante su ciclo de vida. Los datos se refieren a la unidad funcional definida anteriormente.

### **Evaluación del impacto del ciclo de vida**

La fase de evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) busca evaluar la significancia potencial de los impactos basados en los resultados del ICV. Esta fase contiene habitualmente los siguientes elementos obligatorios:

- Selección de las categorías de impacto, los indicadores de categoría y los modelos de caracterización;
- clasificación: asignación de resultados del ICV a las categorías de impacto seleccionadas; y
- medición del impacto (caracterización): cálculo de los resultados de indicadores de categoría.

Además, es posible incluir algunos elementos adicionales como:

- normalización;
- agrupación;
- ponderación;
- análisis de la calidad de los datos.

#### **Interpretación del ciclo de vida**

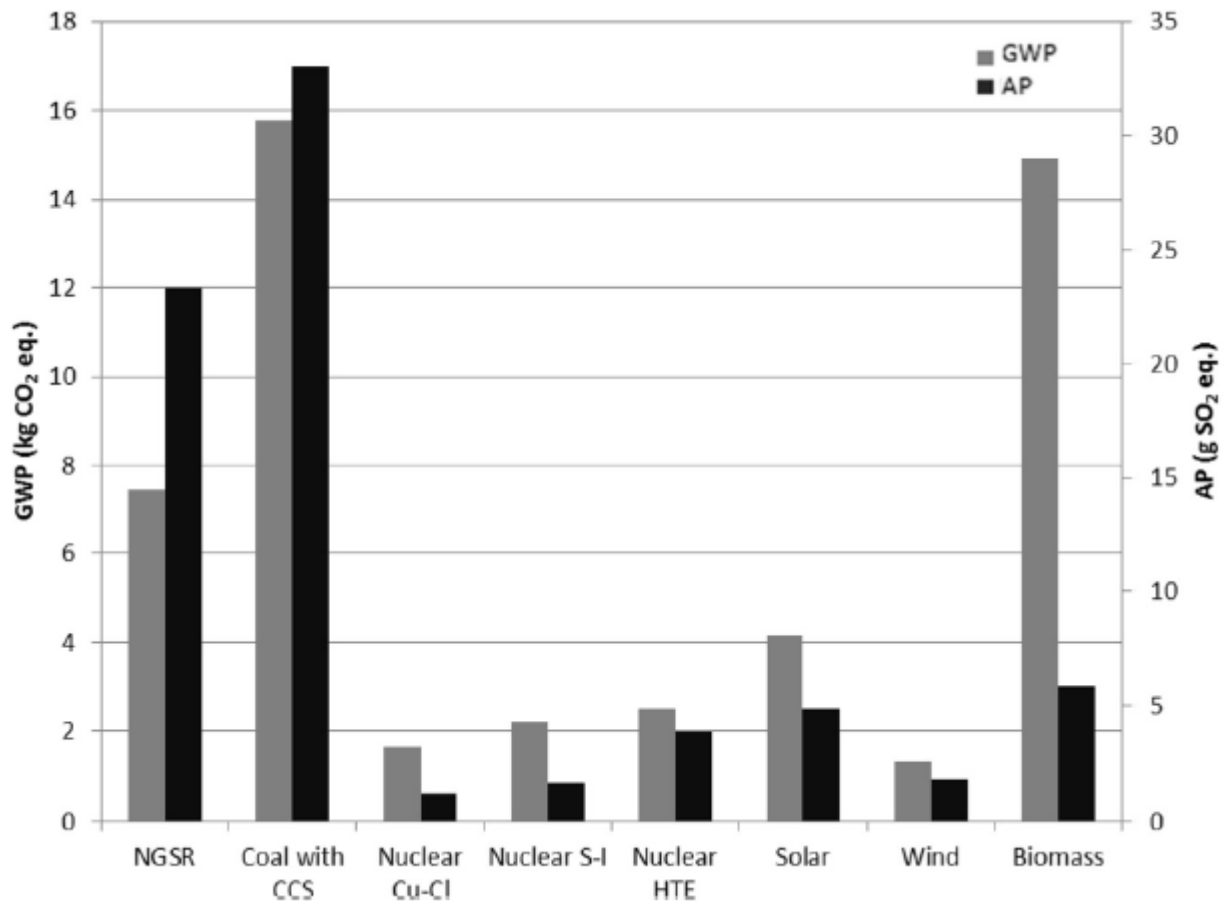
La interpretación del ciclo de vida es una técnica sistemática para identificar, cuantificar, comprobar y evaluar la información de los resultados del Inventario de Ciclo de Vida y/o de la Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida. Esta fase incluye los siguientes elementos:

- identificación de los asuntos significativos basados en los resultados del ICV y la EICV;
- una evaluación del estudio que considere su integridad, sensibilidad y coherencia;
- conclusiones, limitaciones y recomendaciones.

En la figura 23 se representan los resultados del impacto ambiental generado por los distintos métodos de producción de hidrógeno, en términos de emisiones de CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>.

- Los métodos de producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles son los más dañinos ambientalmente.
- La gasificación de la biomasa, aunque presenta valores relativamente bajos de emisiones de CO<sub>2</sub>, presenta los mayores efectos de acidificación en comparación con los otros métodos seleccionados.

Se puede además observar que los métodos de producción de hidrógeno usando ciclos termoquímicos son los que menos consecuencias medioambientales presentan.



*Figura 23: Efectos contaminantes de distintas tecnologías de producción de hidrógeno. [7]*

GWP: Global Warming Potential.

AP: Acidification Potential.

## 5. Comparación en términos del coste social del carbono.

---

El coste social del carbono es una estimación de los daños económicos o pérdidas asociadas a un pequeño incremento de las emisiones de dióxido de carbono, generalmente una tonelada métrica, en un año determinado. Expresado en unidades monetarias (dólares) también representa el valor de los daños evitados con una pequeña reducción de las emisiones, es decir, los beneficios de una reducción de CO<sub>2</sub>.

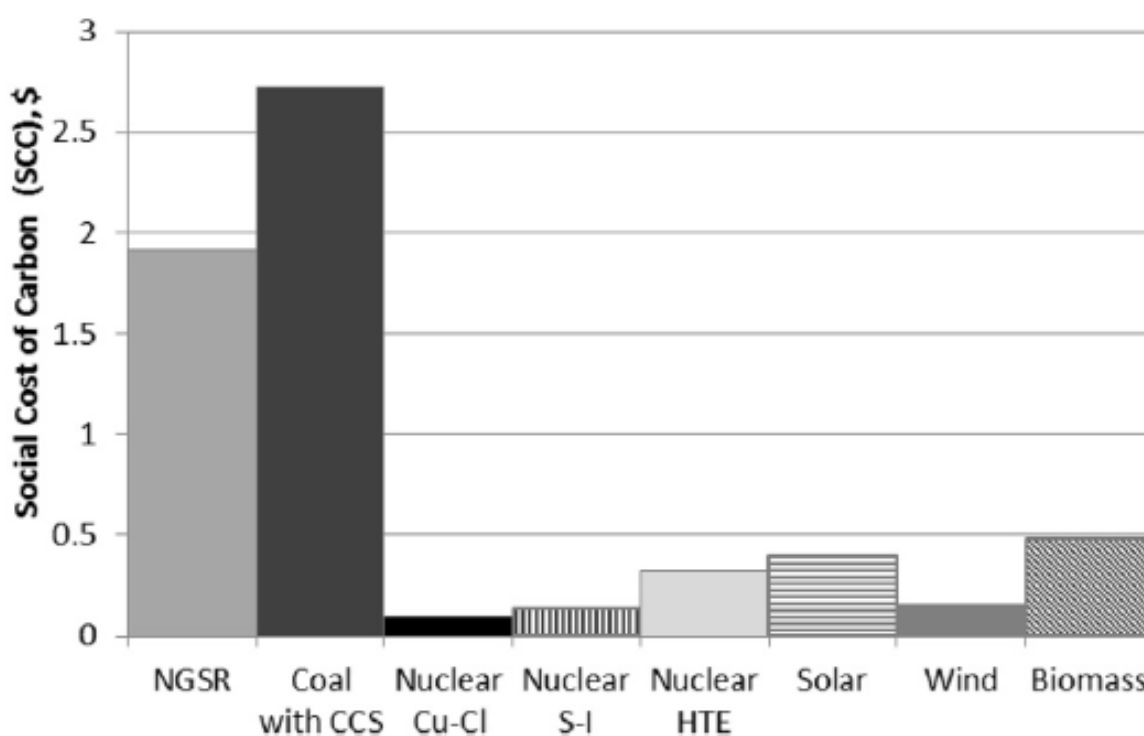
El coste social del carbono es una medida del coste marginal de una unidad de emisiones de CO<sub>2</sub>, debido a los daños medioambientales causados por esta emisión. Para determinar el valor del coste social del carbono, se usa un modelo de evaluación integrada de referencia. Este sistema de referencia usa un escenario socio-económico en el que se identifica una relación entre los cambios de emisiones y temperatura, y una función para relacionar estos cambios de temperatura con los daños económicos producidos.

Con el objetivo de estimar el coste social del carbono, en primer lugar, los escenarios socio-económicos de referencia (que incluyen datos de producción, población y emisiones) son utilizados para calcular los cambios climáticos (medidas de concentración de gases de efecto invernadero y temperatura) que causan alguna variación, como daños económicos. A continuación, dichos escenarios son ligeramente perturbados mediante la adicción o eliminación de una unidad de emisiones de CO<sub>2</sub>. El bienestar social, el cual dependerá del consumo y de la elección de los parámetros de descuento, es calculado para cada uno de los escenarios, el de referencia y el ligeramente modificado. El coste social del carbono es la diferencia normalizada entre el bienestar del escenario de referencia y el modificado.

Basándose en el estudio realizado en la Universidad de Cambridge, 'Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change' en 2007, se puede calcular el coste social del carbono para una serie

de métodos de producción de hidrógeno, en el que se ha usado una media del 160\$ por tonelada de emisiones de CO<sub>2</sub> como coste.

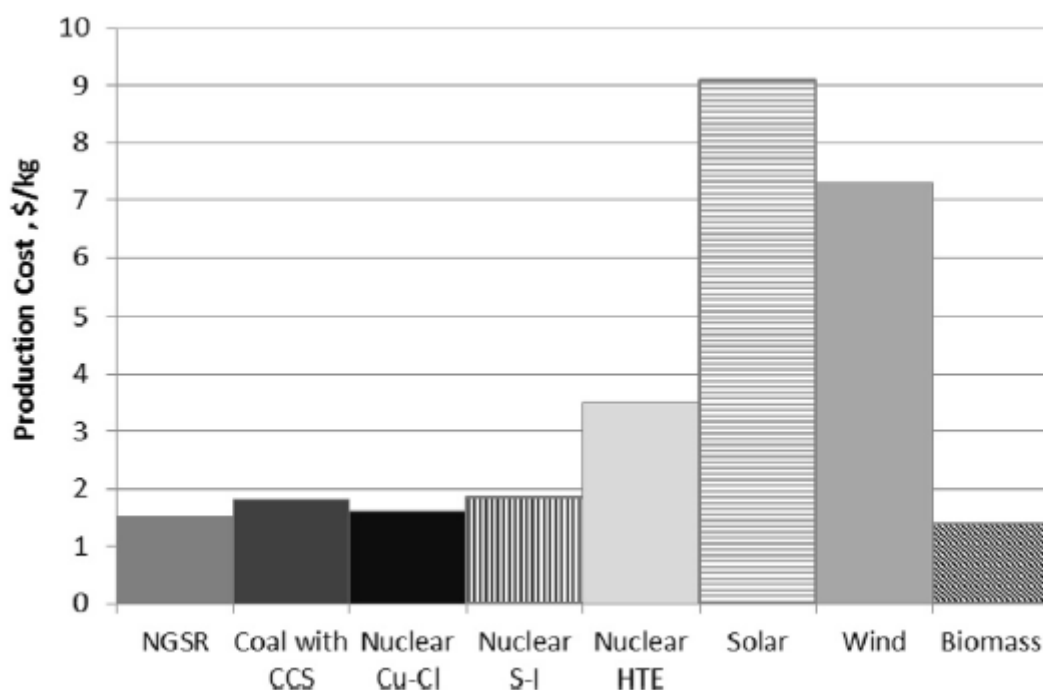
El resultado muestra que la tecnología de los ciclos termoquímicos constituyen los procesos más beneficiosos dentro de los seleccionados. Además, se observa que el coste social del carbono de los métodos que emplean energías renovables no difiere demasiado pero, sin embargo, el reformado de gas natural y la gasificación del carbón resultan ser los más dañinos con bastante diferencia, otra de las razones por la que habría que evitar el uso de combustibles fósiles a la hora de producir hidrógeno.



*Figura 24: Coste social del carbón de distintos métodos de producción de hidrógeno (por kg de hidrógeno). [1]*

## 6. Comparación financiera.

El cálculo del coste de producción de hidrógeno resulta complicado puesto que este coste se ve fuertemente afectado por el nivel de desarrollo de la tecnología empleada, la disponibilidad de infraestructuras existentes y el coste de la materia prima empleada.



*Figura 25: Coste medio de producción de algunos métodos de producción de hidrógeno (por kg de hidrógeno). [1]*

Acorde a la figura anterior, los métodos de producción de hidrógeno que tienen un menor coste son el reformado de gas metano, y la gasificación tanto de carbón como de biomasa. Además, los ciclos termoquímicos expuestos en la figura también son competitivos junto con los precios de los combustibles fósiles y de la biomasa.

El coste de producción de hidrógeno a partir de electrólisis a alta temperatura se encuentra en torno a 2.35-4.80 \$/kg H<sub>2</sub> [Wang ZL et al, Comparison of sulfur-iodine and copper-chlorine thermochemical hydrogen production cycles. Int J Hydrogen

Energy 2010]. Los métodos mostrados en la figura anterior tienen una media del coste de producción de 3.5 \$/ kg H<sub>2</sub>.

La producción de hidrógeno utilizando electrólisis a partir de energía solar o eólica presentan el mayor coste de producción por kg de hidrógeno. Debido a que una de las mayores ventajas de producir hidrógeno a partir de la electrólisis del agua es su carácter local, debido a las simplificaciones en la distribución que esto conlleva, se ha asumido la producción a pequeña escala cuando se ha calculado dicho coste. Sin embargo, el resto de alternativas de producción se han supuesto para producción central a gran escala, y esta es una de las razones por las que se presenta una diferencia tan grande en los costes entre la producción de hidrógeno a partir de la electrólisis y el resto de métodos analizados.

Además de datos sobre el coste por kg de hidrógeno producido, se puede analizar el coste capital de diversos métodos de producción de hidrógeno. En un estudio realizado por Simbeck y Chang, 'Hydrogen supply: cost estimate for hydrogen pathways – scoping analysis. National Renewable Energy Laboratory, 2002', se compara el coste capital de la producción de hidrógeno a partir de reformado de gas metano, la gasificación de carbón, la gasificación de la biomasa y de la electrólisis del agua.

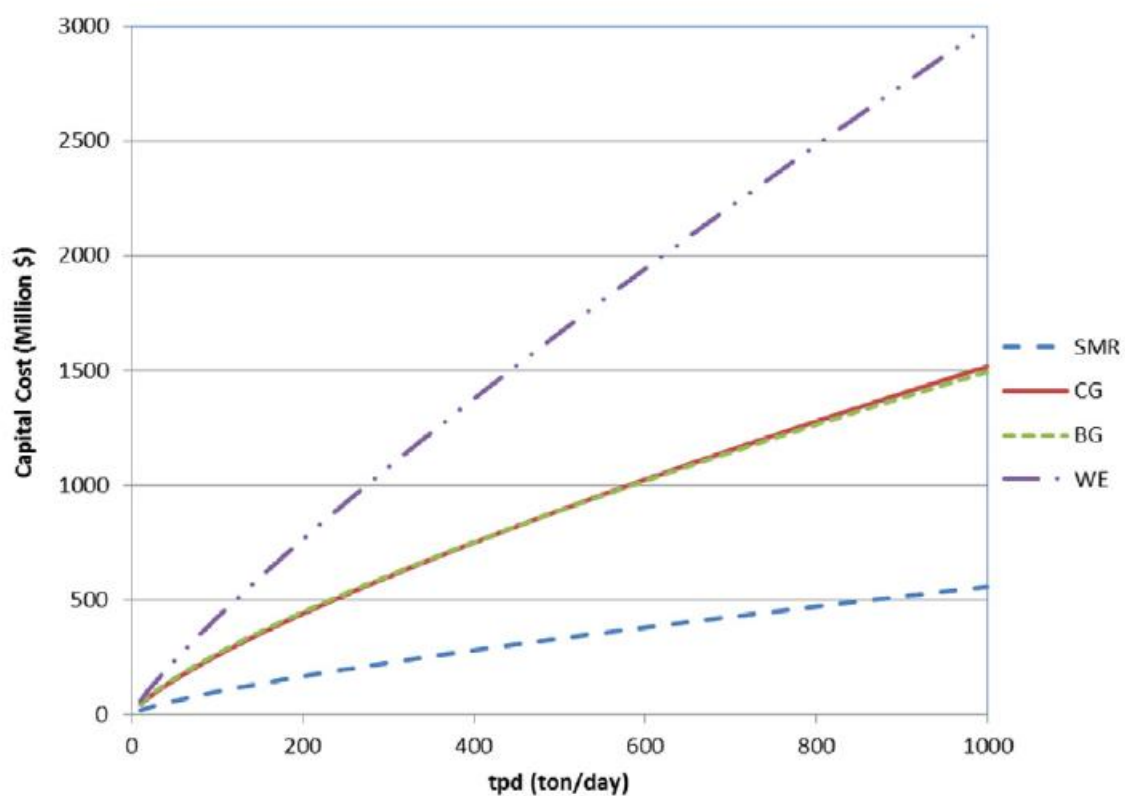
A continuación se muestran las correlaciones entre el coste capital y la capacidad de producción de los métodos de producción de hidrógeno estudiados.



Coste capital de la producción de hidrógeno en función de la capacidad de la planta (toneladas/día)	
Tecnología de producción	Coste capital (millones de \$)
Reformado de gas metano (SMR)	$134 \cdot \left(\frac{Capacidad}{150}\right)^{0.75}$
Gasificación del carbón (CG)	$352 \cdot \left(\frac{Capacidad}{150}\right)^{0.77}$
Gasificación de la biomasa (BG)	$360 \cdot \left(\frac{Capacidad}{150}\right)^{0.75}$
Electrólisis del agua (WE)	$598 \cdot \left(\frac{Capacidad}{150}\right)^{0.85}$

*Figura 26: Coste capital de la producción de hidrógeno. [25]*

En la figura se representa el coste capital de los métodos seleccionados para producciones de 1-1000 toneladas/día. Como se puede observar, la producción de hidrógeno a partir de reformado de gas metano tiene el menor coste capital comparado con el resto de los métodos para todas las capacidades consideradas, mientras que la electrólisis del agua presenta el mayor coste capital. Sin embargo, para producción a pequeña escala, en particular para producción distribuida (menos de 10 toneladas/día), el coste capital de la electrólisis y el reformado son muy parecidos, lo que hace que la producción de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua sea más competitiva para los casos de producción distribuida.



*Figura 27: Relación entre la capacidad de producción y el coste capital de determinados métodos de producción de hidrógeno. [25]*

## 7. Conclusión.

Como conclusión a este estudio, procedo a normalizar los resultados de los distintos aspectos estudiados para cada uno de los métodos de producción de hidrógeno, para así poder comparar los distintos métodos de forma global. Los efectos de impacto ambiental, el coste social del carbón y los costes de producción se normalizarán a partir de la siguiente ecuación:

$$Rango (método i) = \frac{Máx - Método_i}{Máx} 10$$

El rango obtenido se encontrará entre 0 y 10, donde 0 significa un rendimiento pobre y 10 indica el caso ideal (coste cero y emisiones cero). Así, los costes y las emisiones más bajos proporcionan un mayor valor dentro de este ranking. Mediante el proceso empleado, se asigna un valor '0' a los mayores costes y emisiones. *Por ejemplo, en términos de impacto ambiental, como ya sabemos, los métodos de producción de hidrógeno a partir de la gasificación del carbón producen las mayores emisiones; por lo tanto, los efectos de la lluvia ácida y efecto invernadero para dicho proceso de producción están asignados con un valor '0' en la tabla.*

Las eficiencias de los distintos métodos de producción se normalizan haciendo uso de la siguiente ecuación.

$$Eficiencia (método i) = (Eficiencia método i) \cdot 10$$

Nuevamente, el rango de eficiencias se encontrará entre 0 y 10, de manera que 0 significa eficiencia muy pobre y 10 indica una eficiencia del 100%, es decir, el caso ideal.

Las emisiones, el coste y la eficiencia aparecen normalizados en la figura 28:

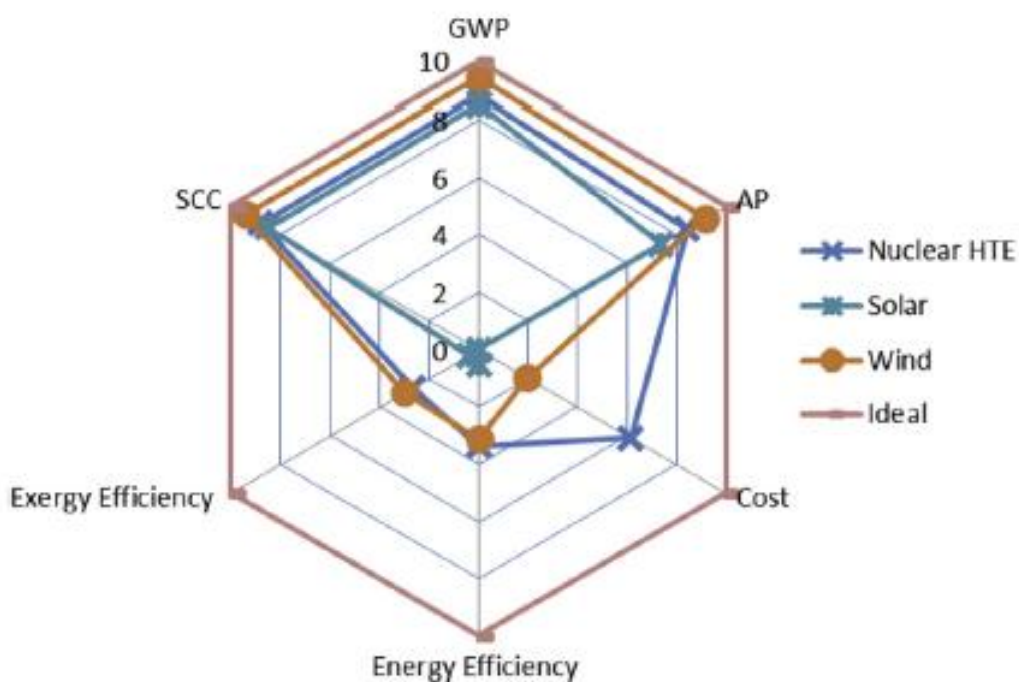
Comparación global de los diversos métodos de producción de hidrógeno estudiados.									
Método de producción		Efecto invern.	Lluvia ácida	Coste social del carbono	Coste	Eficiencia energ.	Eficiencia exerg.	TOTAL	Media
Combustibles fósiles	Reformado GN	2,94	5,27	2,94	8,35	3,75	3,15	26,40	4,40
	Gasificación del carbón	0,00	0,00	0,00	8,02	3,50	3,15	14,67	2,45
Energía nuclear	Ciclos termoquímicos Cu-Cl	9,64	8,96	9,64	8,24	4,15	3,60	44,22	7,37
	Ciclos termoquímicos S-I	9,49	8,60	9,49	7,97	4,15	3,60	43,30	7,22
	Electrólisis a alta temperatura	8,82	8,42	8,82	6,15	3,35	2,65	38,22	6,37
Energías renovables	Elect. Energía solar	8,53	7,37	8,53	0,00	0,50	0,40	25,33	4,22
	Elect. Energía eólica	9,43	9,16	9,43	1,98	3,10	3,00	36,10	6,02
	Gasificación de la biomasa	8,24	0,54	8,24	8,46	6,50	6,00	37,97	6,33
Ideal (0 emisiones y coste, 100% eficiencia)		10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	60,00	10,00

**Figura 28: Comparación global de diversos métodos de producción de hidrógeno. [1]**

El caso hipotético ideal se refiere a un método de producción a coste cero, emisiones cero, lo que también significa un coste social del carbono nulo. Además, las eficiencias energética y exergética de este caso son del 100%.

Acorde a estos datos, se concluye que en términos de eficiencia, el método más cercano al caso ideal es la producción de hidrógeno a partir de la gasificación de la biomasa. Sin embargo, este método presenta un rango de contaminación por lluvia ácida bajo, es decir, es muy contaminante. Además el rango *Efecto Invernadero* y *Coste Social del Carbono* para este método también es bajo, especialmente comparado con los métodos de producción de hidrógeno haciendo uso de ciclos termoquímicos, energía solar o eólica y nuclear para electrólisis a alta temperatura.

En la figura 29 se comparan los métodos de obtención de hidrógeno a partir de la separación electrolítica del agua, tanto a alta como baja temperatura, a partir de los datos de la tabla anterior.



*Figura 29: Comparación global normalizada de los métodos de obtención de hidrógeno a partir de electrólisis del agua. [1]*

La correspondiente figura muestra que, en términos de impacto ambiental (GWP Global Warming Potential, AP Acidification Potential, SCC Social Cost of Carbon), todos los métodos de electrólisis presentan rangos cercanos al caso ideal, hecho que también se puede comprobar en la tabla. Sin embargo, en términos de eficiencia, estos métodos no tienen rangos óptimos.

Comparado con la electrólisis a partir de energía eólica o a alta temperatura, la electrólisis a partir de energía solar presenta el peor dato de costes y eficiencia, de ahí que tenga un valor 0 en costes, pues es el peor de los métodos entre los comparados.

Si nos fijamos en los términos financieros, la electrólisis a alta temperatura se acerca más al caso ideal que aquellos procesos que usan las energías solar o eólica. Sin embargo, los requerimientos de alta temperatura del proceso afectan negativamente a la eficiencia y el coste. Así, mejorar los valores de las eficiencias energética y exergética y disminuir los costes de los métodos que utilizan la electrólisis del agua para obtener hidrógeno será una de las líneas de investigación donde más empeño se ponga próximamente.

En esta última sección se han comparado distintos métodos de producción de hidrógeno basándonos en seis criterios diferentes. Los resultados se han normalizado y se han recogido en la tabla. Comparado con el resto de métodos, los ciclos termoquímicos han obtenido la mayor puntuación en el ranking. Seguido se encuentra la electrólisis a alta temperatura, que obtiene una puntuación total de 38.22 y una media de 6.37/10. Estos valores presentarán una gran mejora si se consigue una mayor eficiencia y una disminución en los costes asociados a dicho proceso. La gasificación de la biomasa y la electrólisis del agua a partir de energía eólica presentan una puntuación similar a los métodos que utilizan energía nuclear, los métodos que mejor puntuación han obtenido en la comparativa realizada. Sin embargo, hay que señalar que el rango obtenido con respecto a Lluvia ácida para el caso de gasificación de la biomasa es considerablemente menor comparado con el resto de métodos, y esto se debe al alto nivel de emisiones de  $\text{SO}_2$ .

El reformado de gas natural (total: 26.40 y media: 4.40/10) y la electrólisis a partir de energía solar (total: 25.33 y media: 4.22/10) tienen unos valores muy bajos dentro del ranking. Esto se debe en parte a los impactos ambientales del proceso, a los altos costes de producción y a las bajas eficiencias de la electrólisis a partir de energía solar.

Entre todos los métodos, el que se encuentra más lejos del caso ideal es la gasificación del carbón. El alto impacto ambiental de este método hace que el mismo baje drásticamente en el ranking a la hora de compararlo con el resto de métodos.

Para finalizar este proyecto, decir que el hidrógeno es ya una realidad inminente y que estamos a las puertas de una sociedad donde el hidrógeno va a jugar un papel muy importante. Son muchas las posibilidades que ofrece el hidrógeno para cubrir las demandas energéticas futuras, y este se considera una alternativa frente al problema del cambio climático, ya que evita la producción de gases de efecto invernadero y el empleo de combustibles fósiles: petróleo, gas natural y petróleo. De ahí radica la

importancia de combinar las técnicas de producción de hidrógeno con las fuentes de energía renovable.

Para un óptimo aprovechamiento de las energías renovables en la obtención de hidrógeno, es necesario llevar a cabo desarrollos en los siguientes campos:

- Disminución de los costes de producción.
- Aumento de las eficiencias de producción.
- Mejora en las técnicas de almacenamiento del hidrógeno.

## Bibliografía

---

- [1] Canan Acar, Ibrahim Dincer (2014). Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources. Int. Journal of Hydrogen Energy 39, 1-12.
- [2] IPCC (2007), Informe del panel internacional del cambio climático.
- [3] J.I. Linares Hurtado, Beatriz Y. Moratilla Soria (2007). Análisis de situación y prospectiva de nuevas tecnologías energéticas. El hidrógeno y la energía. Colección: Avances de Ingeniería. Universidad Pontificia Comillas. Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, Madrid. ISBN: 978-84-932772-9-1.
- [4] E. Cetinkaya, I. Dincer, G.F Naterer (2012). Life cycle assessment of various hydrogen production methods. Int. J. of Hydrogen Energy 37, 2071-2080.
- [5] V. Utgikar, T. Thiesen (2006). Life cycle assessment of high temperature electrolysis for hydrogen production via nuclear energy. Int. J. of Hydrogen Energy 31, 939-944.
- [6] C. Koroneos, A.Dompros, G.Roumbas, N. Moussiopoulos (2004). Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes. Int. J. of Hydrogen Energy 29. 1443-1450.
- [7] Ahmet Ozbilen, Ibrahim Dincer, Marc A. Rosen (2011). A comparative life cycle analysis of hydrogen production via thermochemical water splitting using a Cu-Cl cycle. Int. J. of Hydrogen Energy 36, 11321-11327.
- [8] O. Bicakova, P. Straka (2010). The resources and methods of hydrogen production. Institute of Rock Structure and Mechanics, Academy of sciences of the Czech Republic.
- [9] C.H. Aporta, P.E. Martínez, D.M. Pasquevich (2011). Estudio de los ciclos termoquímicos para la producción de hidrógeno nuclear. Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable, Comisión Nacional de Energía Atómica.
- [10] J.D. Hollaway, J. Hu, D.L. King, Y. Wang (2009). An overview of hydrogen production technologies. Catalysis Today 139, 244-260.
- [11] High Level Group (2003). Hydrogen Energy and Fuel Cells. A vision of our future. Final Report, EUR 207 19 EN.



[12] Pino Lucena, F. J (2010). Análisis de sistemas integrados de producción de hidrógeno a partir de energía eólica. Aportaciones al modelado dinámico de sistemas, dirigido por M. Felipe Rosa Iglesias. Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla.

[13] Fdez-Bolaños B., Clara (2005). Energética del Hidrógeno. Contexto, estado actual y perspectivas de futuro; dirigido por D. Ramón Velázquez Vila. Dpto de Energética y Mecánica de Fluidos, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla.

[14] Blanco Alba, Andrés A. (2014). Análisis de vehículos basados en pila de combustible alimentados por hidrógeno; dirigido por D. Fco. J. Pino. Dpto de Ingeniería Energética, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla.

[15] Holgado S., Héctor (2012). Estudio, diseño y construcción de un generador de hidrógeno por electrólisis; dirigido por Manuel Rodríguez Castillo. Facultar de Náutica de Barcelona.

[16] Familiar Xaudaró, C. (2011). Inyección de hidrógeno como potencial mejora de los motores actuales; dirigido por I. Echevarrieta S. Facultar de Náutica de Barcelona.

[17] Tapia M., Elvira (2012). Estudio de alternativas para la producción de hidrógeno con ciclos termoquímicos y energía solar térmica de alta temperatura; dirigido por Felipe Rosa I., Fco. J. Pino. Dpto de Ingeniería Energética, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla.

[18] R. García-Valverde (2010). Producción de hidrógeno a partir de Energía Solar Fotovoltaica. Dpto. Electrónica, Tecnología de Computadores y Proyectos (DETCP), Universidad Politécnica de Cartagena, Murcia.

[19] M.J Montes, A. Abánades, J.M. Martínez-Val (2006). Producción de hidrógeno a partir de energía solar. Centro de Análisis de Desarrollo Energético Sostenible, FFII. Grupo de Termotecnia, ETSII-UPM.

[20] Steinfeld, A. (2004). Solar thermochemical production of hydrogen. Solar Energy 30, 185-190.

[21] Lache Muñoz, A. (2015). Producción de hidrógeno a partir de energía solar/Hydrogen production from solar energy. Universidad de América, Bogotá, Colombia.

- [22] R. Hino, K. Haga, H. Aita, K. Sekita (2004). R&D on hydrogen production by high-temperature electrolysis steam. *Nuclear Engineering and Design*.
- [23] Centro Nacional del Hidrógeno (CNH): [www.cnh2.es](http://www.cnh2.es)
- [24] A. Ruiz Navarro, *Hidrógeno y Energías Renovables*, ARIEMA.
- [25] Konda NVSNM, Shah N, Brandon NP (2011). Optimal transition towards a large-scale hydrogen infrastructure for the transport sector: the case for the Netherlands. *Int. J. of Hydrogen Energy*.
- [26] <http://www.interstatetraveler.us/Reference-Bibliography/Belona-HydrogenReport.html>
- [27] <http://combustibleverde.blogspot.com.es>
- [28] <http://www.textoscientificos.com/>
- [29] [http://www.lacerca.com/noticias/medio\\_ambiente/hidrogeno\\_futuro\\_energia\\_alternativa-20679-1.html](http://www.lacerca.com/noticias/medio_ambiente/hidrogeno_futuro_energia_alternativa-20679-1.html)